



EESTI MAAÜLIKOOL
Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Asko Põder

**ANDMEANALÜÜS: KASVUHOONEGAASIDE
TAUSTKONTSENTRATSIOONID METSA ÖKOSÜSTEEMIS**

DATA ANALYSIS: GREENHOUSE GASES BACKGROUND
CONCENTRATIONS IN FOREST ECOSYSTEM

Magistritöö

Linna- ja tööstusmaastike korralduse õppekava

Juhendaja: vanemteadur Steffen M. Noe, Dr. rer. nat.

Tartu 2017

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Asko Põder		Õppekava: Linna- ja tööstusmaastike korraldus	
Pealkiri: Andmeanalüüs: kasvuhoonegaaside taustkontsentratsioonid metsa ökosüsteemis			
Lehekülgi: 92	Jooniseid: 30	Tabeleid: 1	Lisasid: 5
Osakond: Taimefüsioloogia osakond			
Uurimisvaldkond: Kasvuhoonegaasid atmosfääris			
Juhendaja(d): Steffen Manfred Noe			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2017			
<p>Atmosfääri ja põhjapoolkera parasvöötme metsaökosüsteemide vastastikmõjud on jätkuva inimtekkelise kasvuhoonegaaside emissioonide kasvu tingimustes aktuaalne teema, kuna boreaalsed metsad arvatakse olevat oluliseks süsiniku neeldajaks. Hemiboreaalsete metsade ja atmosfääri vastastikmõjusid on vähem uuritud, mistõttu töö eesmärgiks võetud Järveljalt segametsast saadud CO₂, CH₄, CO ja H₂O pidevmõõtmiste kontsentratsioonide analüüs aitab seda lünka täita. Järvelja segametsast 24 m kõrguselt maapinnast perioodil 29.03.2012–7.02.2014 kogutud CO₂, CH₄, CO ja H₂O pidevmõõtmiste tulemustest arvutati Python programmeerimiskeele abil poole tunni keskmised osakaalud õhus ning võrreldi nende gaaside ööpäevast ja sesoonset dünaamikat Hyytiälä, Mauna Loa ja Jungfrauochi jaamade vastavate andmetega. CO₂ ööpäevane käik maksimumiga öösel ja miinimumiga keskpäeval on juunis Järveljal suurema amplituudiga kui Hyytiäläs. Oktoobris on Järvelja ja Hyytiälä CO₂ ööpäevase käigu muster, faas, amplituud väga sarnased. Järvelja CH₄ ööpäevase käigu amplituud on nii juunis kui oktoobris märksa suurem kui Hyytiäläs, millest võib teaduskirjandusele tuginedes teha järelduse, et öösiti akumulatuuravad Järveljal lokaalsed CH₄ emissioonid. Järveljal on CO tase madalam kui Hyytiäläs ja kõrgem kui Jungfrauochis. CO ööpäevase tsükli väike amplituud viitab sellele, et CO</p>			

kontsentratsioonis Järveljal on suurim osatähtsus kaugkandel. Veeauru sesoonne tsükkel viitab positiivsele korrelatsioonile õhutemperatuuriga.

Märksõnad: jälggaasid, süsinikdioksiid, metaan, süsinikmonooksiid, veeaur

ABSTRACT

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Asko Põder		Specialty: Management of Urban and Industrial Landscapes	
Title: Data analysis: greenhouse gases background concentrations in forest ecosystem			
Pages: 92	Figures: 30	Tables: 1	Appendixes: 5
Department: Department of Plant Physiology Field of research: Greenhouse gases in atmosphere Supervisors: Steffen Manfred Noe Place and date: Tartu 2017			
Interactions between atmosphere and midlatitudal forest ecosystems in circumstances of continuing increase of anthropogenic greenhouse gas emissions is relevant topic because boreal forest is considered to be vital carbon sink. Interactions between hemiboreal forests and atmosphere are less studied which is why the goal of the thesis to analyse CO ₂ , CH ₄ , CO and H ₂ O concentrations from continuous measurements helps to fill this gap. Continuous measurement results of CO ₂ , CH ₄ , CO and H ₂ O from mixed forest in Järvelja 24 m above ground from period 29.03.2012–7.02.2014 half an hour mixing ratios were calculated using Python programming language. Daily and seasonal cycle of these gases was compared with corresponding data from Hyytiälä, Mauna Loa and Jungfraujoch stations. Daily cycle of CO ₂ , which has maximum at night and minimum in the afternoon has greater amplitude in Järvelja in June than in Hyytiälä. In October the pattern, phase and amplitude of CO ₂ daily cycle in Järvelja and Hyytiälä are very similar. The amplitude of CH ₄ daily cycle is much greater both in June and October in Järvelja compared to Hyytiälä. From this, conclusion can be made, based on scientific literature that at night local CH ₄ emissions accumulate in Järvelja. In Järvelja CO level is lower than in Hyytiälä and higher than in Jungfraujoch. Small amplitude of CO's daily cycle indicates that main proportion of CO concentration in			

Järvselja comes from long-range transport. Seasonal cycle of water vapour refers to positive correlation with air temperature.

Keywords: trace gases, carbon dioxide, methane, carbon monoxide, water vapour

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE.....	1
ABSTRACT.....	3
SISUKORD	5
SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ANALÜÜS.....	9
1.1. Uuritavate jälggaaside tutvustus	9
1.1.1. Süsinikdioksiid (CO ₂).....	9
1.1.2. Süsinikmonooksiid (CO)	10
1.1.3. Metaan (CH ₄).....	11
1.1.4. Veeaur (H ₂ O)	12
1.2. Metsa ökosüsteemi kasvuhoonegaaside varasemad uuringud.....	13
1.2.1. CO ₂ kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis	13
1.2.2. CH ₄ kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis	21
1.2.3. CO kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis	24
1.2.4. Veeauru (H ₂ O) kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis.....	28
2. MATERJAL JA METOODIKA	29
2.1. Mõõtmiskohtade kirjeldus.....	29
2.1.1. Järvelja	29
2.1.2. Hyytiälä.....	30
2.1.3. Mauna Loa	31
2.1.4. Jungfrauoch.....	31
2.2. Andmete kogumine ja töötlemine	31
3. TULEMUSED JA ARUTELU	35
3.1. CO ₂ sesoonne ja ööpäevane dünaamika.....	35
3.2. CH ₄ sesoonne ja ööpäevane dünaamika.....	44
3.3. CO sesoonne ja ööpäevane dünaamika	52
3.4. Veeauru (H ₂ O) sesoonne ja ööpäevane dünaamika	60
KOKKUVÕTE	64
KASUTATUD KIRJANDUS.....	66
SUMMARY.....	79
LISAD.....	82
Lisa 1. Algandmete koondamiseks kasutatud skripti näide	83

Lisa 2. Järvelja CO ₂ ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013	84
Lisa 3. Järvelja CH ₄ ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013	86
Lisa 4. Järvelja CO ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013	88
Lisa 5. Järvelja H ₂ O ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013	90

SISSEJUHATUS

Inimtekkeline järjest suurenev kasvuhoonegaaside emissioon alates eelindustriaalsest perioodist (1750ndad) on viinud kasvuhoonegaaside — süsinikdioksiidi (CO₂), metaani (CH₄) ja lämmastikoksiidi (N₂O) — kontsentratsioonid atmosfääris kõrgeimale tasemele vähemalt viimase 800 000 aasta lõikes (Climate Change... 2014). Näiteks perioodi 1750-2011 kumulatiivne inimtekkeline CO₂ emissioon atmosfääri oli 2040±310 GtCO₂, millest 40% (880±35 GtCO₂) on jäänud atmosfääri ja ülejäänud on seotud taimestiku, mullastiku ja ookeani poolt (Climate Change... 2014). Kasvuhoonegaaside kontsentratsioonide tõusul on mõju kliimasüsteemile. Näiteks 1951. aastast on jälgitav maakera keskmise pinnatemperatuuri (*global average surface temperature*) tõus, mis omakorda on arvatavaks põhjuseks mitmetele keskkonnas jälgitavatele muutustele, näiteks muutused globaalses veeringes ja jääliustike taandumine alates 1960ndatest, Gröönimaa jäämassiivi pinnalt sulamise suurenemine alates 1993. aastast, Arktika merejää sulamine alates 1979. aastast, ülemaailmne keskmine merevee taseme tõus alates 1970ndatest, muutused liikide levikuareaalide piirides, rändemustrites, arvukuses, omavahelistes seostes, muutused põllukultuuride saagikuses (Climate Change... 2014).

Inimtekkelise kasvuhoonegaaside emissiooni mõju hindamisel kliimasüsteemile on senini üheks olulisemaks „tundmatuks teguriks“ kliima ja biosfääri vastastikune mõju (Andreae *et al.* 2015). Sõltuvalt muutuva kliima ja biosfääri vastastikusest mõjust võib elustik toimida kasvuhoonegaaside neto allikana või neto neeldajana (Andreae *et al.* 2015). Maismaa-alade biosfääri rolli selgitamiseks globaalses kasvuhoonegaaside bilansis on viimasel kümnendil järjest rohkem hakatud tähelepanu pöörama kasvuhoonegaaside kontsentratsioonide ja voogude mõõtmisele boreaalsete metsade atmosfääri piirikihis (*atmospheric boundary layer*). Põhjapoolkera boreaalsed metsad on huviorbiidis, kuna mõningate uuringute andmetel võib olla tegemist süsinikubilansis seni tuvastamata (jäänud) olulise CO₂ neeldajaga (*sink*) põhjapoolkera maismaa-alal (Ciais *et al.* 1995; Gurney *et al.* 2002). Samas on ka seisukohti, et põhjapoolkera boreaalsed metsad võivad olla hoopiski kasvuhoonegaaside allikaks (*source*) ning mõjutada globaalset kliimat läbi suure mulla süsiniku varu (Post *et al.* 1982; Kurz ja Apps 1995), läbi metaani voogude muutuse turbaaladelt (Reeburgh, Whalen 1992; Roulet, Ash 1992)

või talveperioodi albeedo ning regionaalsete energiavoogude muutuste kaudu (Bonan *et al.* 1992; Thomas ja Rowntree 1992). Borealse metsavööndi lõunaosas paiknevad hemiborealsed segametsad, mis võrreldes boreaalsete metsade ökosüsteemidega on nii ruumis kui ajas palju heterogeensemad (Noe *et al.* 2016). Hemiborealse metsavööndi ulatus Euraasias põhjast lõunasse võib olla 600 km (nt Rootsis) ja rohkemgi (Nilsson 1997). Ka Eesti jääb tervikuna sellesse tsooni (Noe *et al.* 2012). Arvatakse, et seoses kliimamuutustega nihkub hemiboreaalne metsavöönd põhja poole (*Ibid.*). Hemiboreaalsetes segametsades paiknevaid atmosfääri ja/või ökosüsteemi-atmosfääri seoste uurimiseks mõeldud mõõtejaamu on maailmas vähe. Samuti on vähe teadustöid, -artikleid jm kirjandusallikaid, mis käsitleksid sellistest jaamadest mõõdetud CO₂, CH₄ jt. atmosfääri jälggaaside (*trace gases*) kontsentratsioone. Atmosfäär koosneb kahest põhigaasist, lämmastikust (ruumalalt 78% atmosfäärist) ja hapnikust (ruumalalt 21% atmosfäärist). Jälggaasideks (*trace gas*) loetakse järelejäänud 1% atmosfääri ruumalast hõlmavaid gaase (argoon, neon, heelium, krüptoon, ksenoon, vesinik, süsinikdioksiid, metaan, lämmastikoksiid, veeaur, osoon jt.). Käesoleva töö uurimiseesmärgiks on Kagu-Eestist Järveljalt (58°16'17,301'' N 27°16'12,91'') 24 m kõrguselt hemiborealsest metsast perioodil 29.03.2012–7.02.2014 mõõdetud atmosfääri jälggaaside (*trace gases*) CO₂, CH₄, CO ja H₂O kontsentratsioonide analüüs. Töö uurimisküsimused on: 1) tuvastada jälggaaside CO₂, CH₄, CO ja H₂O kontsentratsioonide ööpäevane ja sesoonne dünaamika Järveljal ning, 2) võrrelda Järvelja CO₂, CH₄, CO ja H₂O ööpäevast ja sesoonset dünaamikat teiste jaamade (Hyytiälä, Mauna Loa, Jungfraujoch) vastavate andmetega. Käesolev töö toetab ka rahvusvaheliste kliimauuringute alaste koostööprojektide (näiteks ICOS, AnaEE) seatud eesmärki, et atmosfääri mõõtmisjaamadest kogutud andmed tuleks tõlgendada laiemale avalikkusele arusaadavamaks infoks. Töö põhiosas antakse esmalt uuritavate gaaside tutvustus, seejärel tehakse ülevaade metsa ökosüsteemidest mõõdetud kasvuhoonegaaside teiste uuringute tulemustest. Töö metoodika peatükis tutvustatakse mõõtejaamu, mille andmeid analüüsitakse, samuti kirjeldatakse andmete töötlemise käiku. Uuringu tulemused on visualiseeritud graafikutel, Järvelja ööpäevase käigu graafikute algandmed on toodud lisades.

1. KIRJANDUSE ANALÜÜS

1.1. Uuritavate jälggaaside tutvustus

1.1.1. Süsinikdioksiid (CO₂)

Süsinikdioksiid (CO₂) on keemiline ühend, milles kaks hapniku (O₂) aatomit on kovalentselt seotud ühe süsiniku (C) aatomiga (About carbon... 2017). CO₂ on üks paljudest Maal esinevatest süsiniku keemilistest vormidest (Plains CO₂... 2017). Standardse temperatuuri ja rõhu juures (About carbon... 2017) on CO₂ värvitu ja lõhnatu gaas, mis lahustub vees, etanoolis ja atsetoonis (O'Leary 2000). Temperatuuril alla -78°C kondenseerub CO₂ tahkesse olekusse ehk muutub nn. kuivaks jääks (*dry ice*) (Plains CO₂... 2017). Rõhul üle 5,1 atmosfääri saab CO₂ viia vedelasse olekusse (*Ibid.*). Anorgaaniline CO₂ tekib Maa sisemuses toimuvate protsesside käigus (*Ibid.*) ja jõuab sealt maa pinnale vulkaanipursetega, kuumaveeallikatega vmt. geotermaalsete protsessidega (About carbon... 2017). CO₂ võib sarnaselt maagaasile ja naftale moodustada maakoos suuri kogumeid/reservuaare (Plains CO₂... 2017). CO₂ vabaneb atmosfääri mikroorganismide, loomade, taimede, seente hingamise (*respiration*) ja surnud süsinikuühendeid sisaldava biomassi (nt. lehed, juured) lagunemise (*decomposition*) käigus. Vastassuunalise protsessi, fotosünteesi käigus, seovad taimed atmosfääri CO₂ muundades selle oma elutegevuseks ja kasvuks vajalikeks orgaanilise süsiniku ühenditeks (About carbon... 2017). Seega on CO₂-l võtmeroll globaalses süsinikuringes. Inimese tegevuse tulemusena vabaneb CO₂ atmosfääri peamiselt fossiilsete kütuste või taimse biomassi põletamise käigus (About carbon... 2017), aga ka näiteks tsemendi tootmisel, alkoholsete jookide valmistamisel suhkrute fermentatsioonil (About carbon... 2017). Atmosfääri koostises olev CO₂ on jälggaas, mille kontsentratsioon atmosfääris on praegu 405,75 ppm-i (Dlugokencky, Tans 2017). Ühtlasi kuulub CO₂ ka kasvuhoonegaaside hulka, osaledes nn. kasvuhooneefekti protsessis. Kasvuhooneefekti käigus absorbeeritakse atmosfääri kasvuhoonegaaside poolt oluline osa Maa pinnalt peegeldunud (pika lainepikkusega) päikese kiirgusest (Halmann, Steinberg 1999) ning sellega on takistatud soojuse hajumine kosmosesse. CO₂ püsib atmosfääris väga kaua: 60–80% atmosfääri paisatud CO₂-st lahustub ookeanides 2–20

sajandiga, ülejäänud 20–40% CO₂-st jääb atmosfääri veel tuhandeteks aastateks eemaldudes sealt aeglaste reaktsioonide käigus CaCO₃ ja tardkivimitega (*igneous rocks*) (Archer *et al.* 2009). CO₂ leiab kasutust paljudes eluvaldkondades: näiteks veeldatud CO₂ kasutatakse tulekustutites, CO₂ lisatakse mullide tekitamiseks karastusjookidele, tahket CO₂ ehk nn. kuiva jääd kasutatakse toiduainete külmana hoidmiseks ilma külmutusseadmeteta, gaasilist CO₂ kasutatakse tööriistade pneumaatilistes süsteemides (About carbon... 2017).

1.1.2. Süsinikmonooksiid (CO)

Süsinik monooksiid (CO) on värvitu, lõhnatu, maitseta, mittekorrosiivne ja toksiline gaas (Penney 2002), mis tekib süsiniku mittetäielikul põlemisel, st. põlemisel hapnikuvaeses keskkonnas (Thompson 2005). CO on inimesele toksiline kontsentratsioonidest õhus alates 0,1% (1000 ppm). Toksilisus tuleneb sellest, et CO takistab punaste vereliblede koosseisus oleval hemoglobiinil siduda ja seega kanda organismi laiali hapnikku (*Ibid.*). CO looduslikud allikad on vulkaanid ja metsapõlengud, samuti taimede metabolism, CH₄ ja mittemetaaniliste süsivesinike (*non-methane hydrocarbons*) oksüdatsioon, fotokeemilised reaktsioonid troposfääris ja ookeanis (ul-Haq *et al.* 2015a), bioloogilised protsessid mullas (Finlayson-Pitts, Pitts 2000). Üle poole atmosfääris olevast CO-st on inimtekkeline (Petrenko *et al.* 2013) ja seetõttu sisaldab põhjapoolkera atmosfäär umbes kaks korda rohkem CO-d kui lõunapoolkera atmosfäär (Ehhalt *et al.* 2017). Inimtegevuse tulemusena tekib CO süsinikupõhiste kütuste (maagaas, diislikütus, bensiin) mittetäielikul põletamisel (nt. autotranspordis) ja tööstuses (nt. terasetööstuses) (Carbon monoxide 2005). Süsinik monooksiid on tähtis õhusaaste indikaator (What is... 2017). Näiteks linnades reageerib see teiste saasteainetega ja moodustab fotokeemilist sudu (ul-Haq *et al.* 2015a). Piisava NO_x-de kontsentratsioonide korral õhus tekib CO oksüdeerumise tulemusena HO₂, millest omakorda võib fotokeemiliste reaktsioonide tulemusena tekkida troposfääri osoon (Chi *et al.* 2013). Osoon on ühend, mille kõrge tase troposfääris mõjub negatiivselt inimeste tervisele (Ebi, McGregor 2008), taimedele (Karnosky *et al.* 2007) ja võimendab kliima soojenemist (Climate Change... 2007). CO-d loetakse ka kaudseks kasvuhoonegaasiks kuna see reageerib troposfääris hüdroksüül (OH) radikaalidega vähendades sellega troposfääri oksüdatsioonivõimet (ul-Haq *et al.* 2015a). Selle tulemusena jääb troposfääri vähem OH radikaale, mis saaksid siduda

atmosfääris olevat tugevat kasvuhoonegaasi metaani (CH_4) ja troposfääri osooni (Girach, Nair 2014). CO reageerimine OH radikaalidega on kõige olulisem CO neeldaja (*sink*) (> 95%) (Duncan *et al.* 2007). CO eluiga (*lifetime*) troposfääris on kuni kaks kuud (Sze 1977; Crutzen, Zimmermann 1991; Chi *et al.* 2013). CO kontsentratsioon atmosfääris on väga varieeruv sõltuvalt piirkonna meteoroloogilistest tingimustest ja kaugkande trajektooridest (Girach, Nair 2014), piirkonna CO allikatest ja neeldajatest, CO suhteliselt lühikesest elueast (*lifetime*) troposfääris (Crutzen, Zimmermann 1991) jm. teguritest. Kõrgematel põhjalaiuskraadidel ulatub CO kontsentratsioon atmosfääris 60 ppb-st suviti kuni 200 ppb-ni talviti (Climate Change... 2001). Lõunapoolusel varieerub kontsentratsioon 30 ppb-st suviti kuni 65 ppb-ni talviti (*Ibid.*).

1.1.3. Metaan (CH_4)

Metaan (CH_4) on lõhnatu, värvitu, õhust kergem, looduses laialt levinud gaas (Chemical... 2017). Vees lahustub metaan vaid vähesel määral (Methane: Chemical... 2017). Metaan põleb väga hästi, põlemise produktid on süsinikdioksiid (CO_2) ja veeaur (*Ibid.*). Üldiselt on metaan keemiliselt stabiilne, kuid metaani ja õhu segu metaani osakaaluga 5–15% on plahvatusohtlik (*Ibid.*). Sellise segu plahvatused on sagedased söekaevandustes. Metaan ei ole inimese jaoks otseselt toksiline, kuid võib põhjustada sissehingamisel lämbumist seeläbi, et sissehingatavad hapniku kogused vähenevad (*Ibid.*). Metaan tekib termogeensete, pürogeensete või mikroobsete protsesside käigus (ul-Haq *et al.* 2015b). Termogeenselt tekib metaan maakoos kõrge rõhu ja temperatuuri tingimustes orgaanilise materjali muundumise tulemusena (*Ibid.*). Selliselt on tekkinud näiteks maagaasi koosseisus olev metaan. Metaan moodustab maagaasist umbes 75% (Methane: Chemical... 2017) ja seetõttu kasutatakse metaani põhiliselt kütusena. Maakoos termogeenselt moodustunud metaan satub atmosfääri näiteks geoloogiliste rikkekohtade, mudavulkaanide kaudu (Climate Change... 2007) ja maagaasi, nafta puurimise, töötlemise ja transpordi käigus (ul-Haq *et al.* 2015b). Pürogeenselt tekib metaan mittefossiilse orgaanilise aine mittetäielikul põlemisel näiteks metsa-, savannipõlengute, põllukultuuride jääkide põletamise ja biokütuste põletamise käigus (*Ibid.*). Mikroobsete protsesside tulemusena tekib metaan näiteks orgaanilise aine lagunemisel anaeroobsetes tingimustes (Basics... 2017) märgaladel, reovee käitlusel, prügilates, riisi kasvatamisel, termiitide ja mäletsevate koduloomade soolestikus seedeprotsesside käigus (Reay 2017).

Metaani allikaid võib jagada biogeenseteks (*biogenic*) ja mittebiogeenseteks (*non-biogenic*) (Wang *et al.* 2000). Peamisteks biogeenseteks allikateks on riisipõllud, looduslikud märgalad, mäletsejad loomad ja termiidid ning peamisteks mittebiogeenseteks allikateks on biomassi põletamine ja fossiilkütuste kasutamine (*Ibid.*). Umbes 2/3 atmosfäärsest metaanist on antropogeenset päritolu ning emiteeritud põhjapoolkeralt (Lelieveld 2006). Metaan on ühest küljest tugev kasvuhoonegaas, mille atmosfääri soojendav potentsiaal on 100 aasta perspektiivist hinnates 28–36 korda suurem kui CO₂-l (Chai *et al.* 2016). Teisalt on metaan atmosfääris kõige külluslikumalt esinev reaktiivne jälggaas (Wuebbles, Hayhoe 2000). Troposfääris toimub CH₄ oksüdatsioon OH radikaalidega, mille tulemusena moodustuvad CO, formaldehüüd (CH₂O) ja piisava lämmastikoksiidide osakaalu korral osoon (O₃) (*Ibid.*). Stratosfääris mõjutab metaan veeauru ja osooni kontsentratsioone ja etendab võtmerolli väga reaktiivse kloriini muundamisel vähem reaktiivseks HCl-ks (*Ibid.*). Metaani kontsentratsioon atmosfääris on tõusnud tööstusrevolutsiooni eelse ajastu 722 ppb-st 1750. a. (Climate Change... 2013) 1847,9 ppb-ni 2017. aastal (Dlugokencky 2017).

1.1.4. Veeaur (H₂O)

Veeaur on vesi gaasilises faasis. Atmosfääri niiskusest 99% esineb veeauru kujul (Atmospheric water... 2017). Veeaur atmosfääris mõjutab olulisel määral mitmeid atmosfääri füüsikalisi ja keemilisi omadusi, sh. ilma, pilvi, sademeid, kiirgustasakaalu (*radiation balance*), välkude tekkimist, konveksioonilist tõusu (*convective uplift*) (ESRL/GMD... 2017). Veeaur on kõige olulisem kasvuhoonegaas (Climate Change... 2007) ning oluline kliimasüsteemide kujundaja (Water vapour... 1995). Kliima soojenedes veeauru roll kasvuhoonegaasina võimendub, sest Maa pinnalt aurustumise suurenemise tõttu tekib atmosfääri rohkem veeauru (Water vapour... 1995). Soojem atmosfäär on võimeline hoidma rohkem vett veeauruna enne kui veeaur pilvedeks kondenseerub ja sademetena Maa pinnale tagasi jõuab (*Ibid.*). Suurem kogus veeauru atmosfääris põhjustab täiendavat kliima soojenemist kasvuhooneefekti tõttu, kuna veeaur absorbeerib Maa pinnalt peegeldunud pikalainelise kiirguse (*Ibid.*). Veeaurul on seega oluline koht hüdroloogilises ringes, mis omakorda on tihedalt seotud atmosfääri tsirkulatsiooniga (*Ibid.*). Nende ringete käigus toimub: 1) päikeseenergia mõjul vee aurustumine Maa pinnalt, 2) veeauru vertikaalne ja horisontaalne kolmedimensiooniline liikumine atmosfääris, millega kantakse globaalselt laiali veeauru latentne soojus (*latent*

heat), 3) veeauru kondenseerumine jääkristallidest või väikestest veepiiskadest koosnevateks pilvedeks ning vee jõudmine sademetena tagasi Maa pinnale (*Ibid.*). Nende ringete käigus on veemolekul atmosfääris keskmiselt 10 päeva (Water vapor... 2017). Veeaur on ka peamine atmosfääri paljudest saasteainetest puhastava oksüdeerija, hüdroksüül (OH) radikaali allikas (Seidel 2003). Veeauru kontsentratsioon atmosfääris võib tugevasti kõikuda sõltuvalt Maa pinna temperatuurist, paiga kõrgusest merepinnast, õhumasside liikumisest (*Ibid.*). Veeauru kontsentratsioon atmosfääris on 0–4% (Lagzi *et al.* 2013), keskmiselt 2–3% kogu atmosfääris olevatest molekulidest. Näiteks kõige rohkem on veeauru atmosfääris ekvaatori ümbruses Vaikse ookeani lääneosas, kõige vähem pooluste kohal (Seidel 2003). Veeauru kontsentratsioon väheneb järsult kõrguse kasvades (*Ibid.*). Pea pool veeauru kogusest asub allapoole kõrgust 1,5 km, 5% asub troposfääri ülaosas (kõrgusel üle 5 km) ja vähem kui 1% paikneb stratosfääris (kõrgusel üle 12 km) (*Ibid.*).

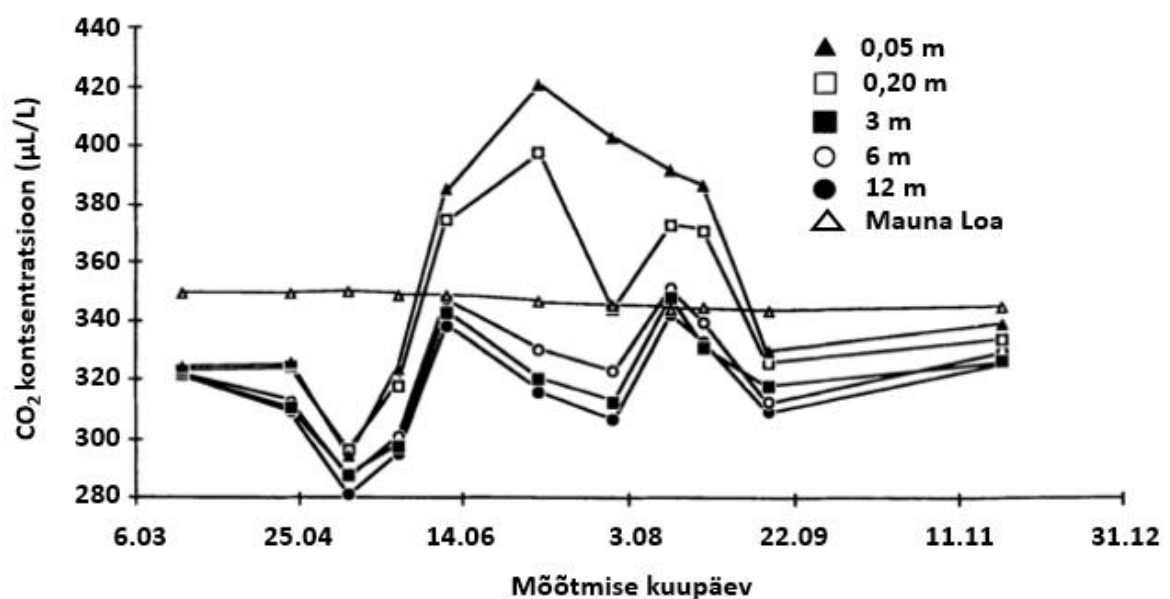
1.2. Metsa ökosüsteemi kasvuhoonegaaside varasemad uuringud

1.2.1. CO₂ kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis

Erinevate metsa ökosüsteemide kasvuhoonegaaside ajalis-ruumilise dünaamika uurimine võimaldab hinnata, kui tihedalt on mets seotud atmosfääri konvektiivse piirikihiga (*convective boundary layer*) võrastiku kohal (Buchmann *et al.* 1996). Selle põhjal saab hinnata kui tundlikud on erinevad metsa ökosüsteemid kasvuhoonegaaside kontsentratsioonide tõusule atmosfääris. Kasvuhoonegaaside dünaamika tundmine erinevates metsa ökosüsteemides praeguste kliimaolude korral võimaldab ennustada kasvuhoonegaaside allikate ja neeldajate jaotumist erinevates metsa ökosüsteemides kliima muutumisel (*Ibid.*). Metsa ökosüsteemiga vahetult seotud õhus võivad kasvuhoonegaaside kontsentratsioonid olla tunduvalt erinevad võrreldes nende kontsentratsioonidega, mis saadakse globaalset taustkontsentratsioone mõõtvatest jaamadest, nt. Hawaiiil asuvast Mauna Loa jaamast (Bazzaz, Williams 1991).

Vastavalt bioloogia põhitõdedele võib eeldada, et CO₂ kontsentratsioon metsa ökosüsteemis sõltub fotosünteesist, hingamisest (*respiration*) (Reiners, Anderson 1968). Samuti mõjutavad CO₂ kontsentratsioone mikrokliimaatilised tingimused (*Ibid.*) ja

turbulentne õhu segunemine (Buchmann *et al.* 1997). Bazzaz ja Williams (1991) uurisid CO₂ kontsentratsiooni dünaamikat *Quercus* ja *Acer* perekonna puuliikidest koosnevas 20–25 m kõrguses lehtmetsas USA-s Massachusettsis Petershamis. CO₂ mõõtmised toimusid 1985. a. märtsi keskpaigast novembri keskpaigani kõrgustelt 0,05–12 m infrapuna gaasianalüüsi süsteemiga. Bazzaz ja Williams'i (1991) uuringu tulemusena leidis kinnitust CO₂ kontsentratsioonide sesoonne muster — suvisesel aktiivsel fotosünteesi perioodil olid CO₂ kontsentratsioonid kõrgemad võrreldes kevade ja sügisega (joonis 1). Madalamatelt kõrgustelt mõõdeti kõrgemad CO₂ kontsentratsioonid (Bazzaz, Williams 1991). See ilmneb eriti teravalt suviste mõõtmistulemuste puhul. Joonisele võrdluseks lisatud Mauna Loa'st mõõdetud CO₂ kontsentratsioonid on stabiilsed ja eristuvad sellega tunduvalt metsa ökosüsteemi poolt mõjutatud kontsentratsioonidest. Ööpäevane CO₂ kontsentratsioonide kõikumise amplituud oli suurim suvekuudel ja enamasti kogu mõõtmisperioodi jooksul olid kontsentratsioonid kõrgemad öösiti (*Ibid.*).



Joonis 1. CO₂ kontsentratsiooni sesoonne dünaamika 1985. a. Harvard Forest (USA, Massachusetts, Petersham) lehtmetsas Bazzazi ja Williamsi (1991) järgi

Maapinnalähedaste CO₂ kontsentratsioonide ja võra ülemise osa CO₂ kontsentratsiooni vahelise gradiendi põhjusena nimetavad Bazzaz ja Williams (1991) temperatuurist sõltuvat fotosünteesi ja hingamise kiirust ja lehestiku mõju. Lehestik takistab võrastiku õhu ja selle kohale jääva õhu segunemist (Bazzaz, Williams 1991).

Han *et al.* (2003) tegid augustist oktoobrini 1999. a. ja aprillist juulini 2000. a. CO₂ vertikaalse profiili mõõtmisi tamme-männi segametsas Changbai mäel Jilin'i provintsis Kagu-Hiinas (42°24'09''N, 128°05'45''E, kõrgus 738 m). Vanimad puud puistus olid 200-aastased, keskmine puistu võra kõrgus (*canopy height*) oli 26 m. Mõõtmised toimusid erinevatel kõrgustel vahemikus 0,4–62,5 m infrapuna gaasianalüüsi süsteemiga. Han *et al.* (2003) uuringu tulemusena tuvastati suvisesel maksimaalse lehestikuga perioodil CO₂ ööpäevases dünaamikas järgmised korrapärasused:

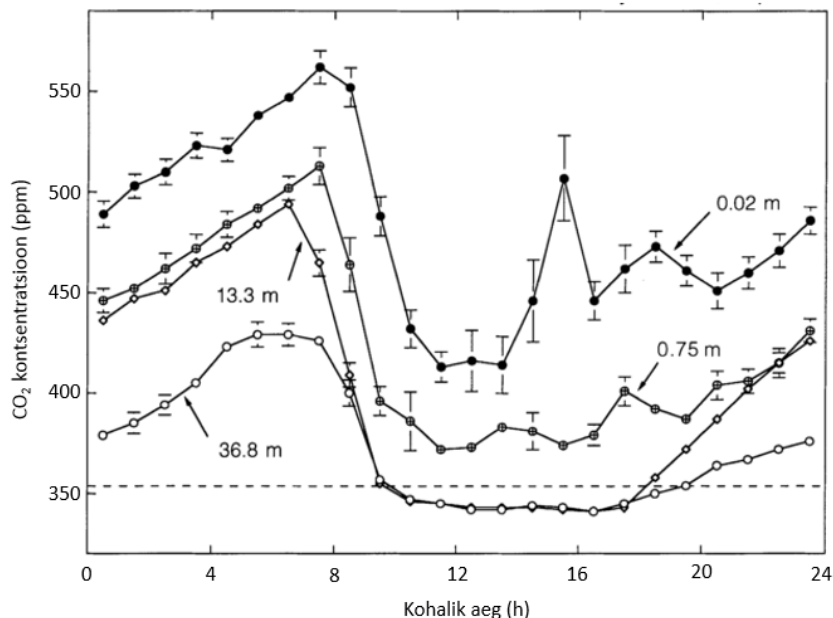
1. Madalamatelt kõrgustelt mõõdeti kõrgemad CO₂ kontsentratsioonid. Näiteks keskööl (24:00) mõõdeti 2,5 m kõrguselt 58 µmol/mol kõrgem kontsentratsioon kui 60 m kõrguselt.
2. CO₂ maksimaalsed kontsentratsioonid mõõdeti üldjuhul vahetult enne koitu.
3. Päeval ajal olid CO₂ kontsentratsioonid madalaimad puistu võrastiku osas ja selle kohale jäävas 3-meetrises kihis. Seega võrastiku osa aktiivselt fotosünteesivate lehtedega toimis CO₂ neeldajana alandades CO₂ kontsentratsiooni.

Analüüsides sesoonset CO₂ dünaamikat tuvastati järgmised korrapärasused (Han *et al.* 2003):

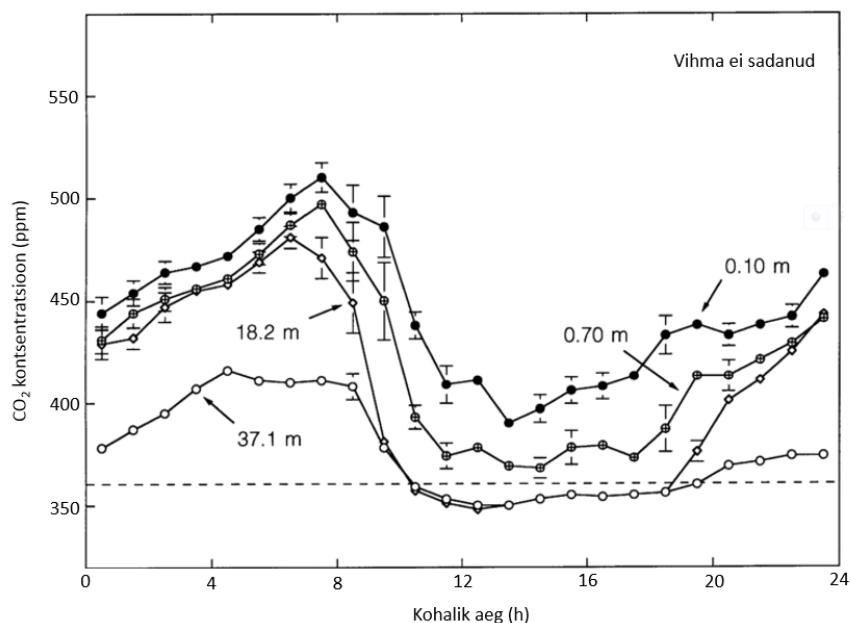
1. Talvisel taimede puhkeperioodil olid CO₂ kontsentratsioonid peaaegu ühesugused nii puistu võraosas kui ülalpool võrastikku (erinevus *ca* 10 µmol/mol).
2. Lehestiku arenedes suveperioodil tekkisid järjest suuremad CO₂ kontsentratsioonide erinevused vertikaalprofiilil (2,5–60 m). Suurim erinevus tuvastati juulis (60 µmol/mol).
3. Sesoonist sõltumata olid maapinna lähedased kontsentratsioonid kõrgemad kui puistu teistel kõrgustel. Seda seletati mulla hingamise mõjuga.

Buchmann *et al.* (1997) uurisid CO₂ kontsentratsiooni Paracou (53°0' W, 5°2' N, 40 m üle merepinna) ekvatoriaalses vihmametsas Prantsuse Guajaanas. Uuritav mets oli 3-rindeline, kuni 35 m kõrgune ja koosnes 60% ulatuses sugukondadesse *Lecythidaceae*, *Caesalpiniaceae* ja *Chrysobalanaceae* kuuluvatest liikidest. CO₂ kontsentratsioone mõõdeti infrapuna CO₂ gaasianalüsaatoriga viiel päeval kuivaperioodil (26.–30. september 1994) ja viiel päeval vihmaperioodil (9.–13. juuli 1995) kuuelt kõrguselt vahemikus 0,02–37,1 m (Buchmann *et al.* 1997). Igalt kõrguselt 10-minutilise intervalliga kogutud andmetest moodustati tunni keskmised andmed. Uuringu tulemusena tuvastatud CO₂ kontsentratsioonide ööpäevane dünaamika (joonis 2 ja joonis 3) oli järgmine:

1. Öö jooksul CO₂ võrastikus akumulēerus, kuna hingamisest (*respiration*) tulenevad CO₂ vood olid suured ja õhu turbulentne segunemine nõrk. CO₂ kontsentratsioon oli suurim 7:30 paiku.
2. Järgnes CO₂ kontsentratsiooni tugev langus (umbes kella 8st 10ni) temperatuuri, tuule kiiruse ja õhu turbulentse segunemise tõusu tõttu.
3. Päeva jooksul öösel tekkinud CO₂ kontsentratsiooni tugev kihistumine nõrgenes.
4. Päeva jooksul (10:30st kuni 16:30ni) püsis CO₂ kontsentratsioon võrastiku ülemises (≥ 30 m) ja keskmises (15–30 m) osas peaaegu muutumatuna jäädes kuivaperioodil *ca* 10 $\mu\text{mol/mol}$ ja vihmaperioodil *ca* 7 $\mu\text{mol/mol}$ allapoole Barbadosel mõõdetud CO₂ troposfääri taustkontsentratsiooni.
5. CO₂ kontsentratsiooni uus tõus võrastikus algas päikesevalguse kadumisega umbes 18:00 paiku.



Joonis 2. Tunni keskmised CO₂ kontsentratsioonid ööpäeva jooksul erinevatel kõrgustel Prantsuse Guajaana Paracou vihmametsas kuivaperioodil (26.–30. september 1994) Buchmann *et al.* (1997) järgi. Punktiirjoonega on Barbadoselt mõõdetud päevane keskmine troposfääri CO₂ taustkontsentratsioon

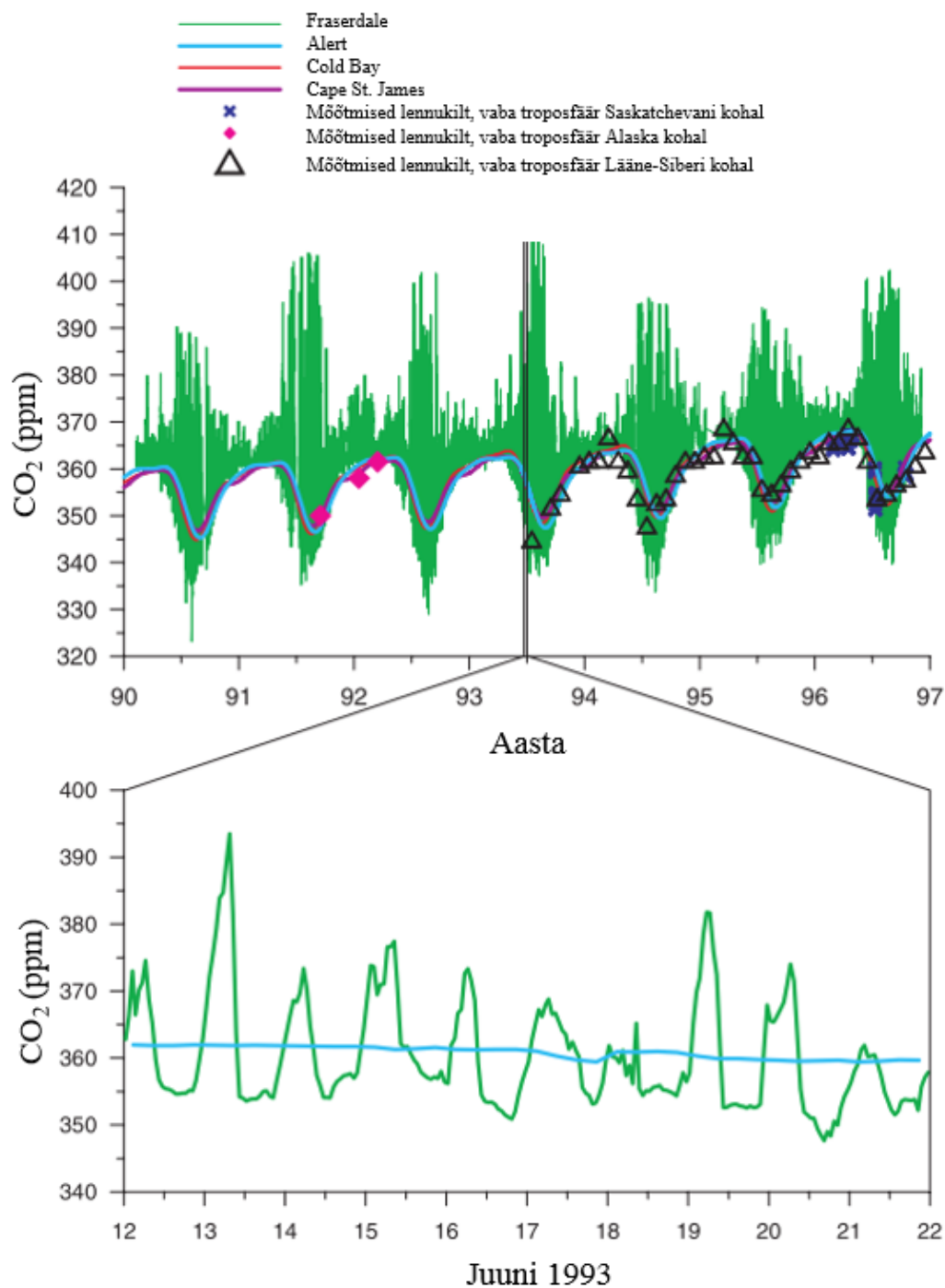


Joonis 3. Tunni keskmised CO₂ kontsentratsioonid ööpäeva jooksul erinevatel kõrgustel Prantsuse Guajaana Paracou vihmametsas vihmaperioodil (3 päeva juulis 1995) Buchmann *et al.* (1997) järgi. Punktiirjoonega on Barbadoselt mõõdetud päevane keskmine troposfääri CO₂ taustkontsentratsioon

Buchmann *et al.* (1997) poolt leiti, et eelpoolkirjeldatud CO₂ kontsentratsiooni ööpäevane käik sarnaneb üldjoontes parasvöötme lehtmetsade omale. Siiski, parasvöötme lehtmetsas langeb CO₂ päeval atmosfääri taustkontsentratsioonist ca 9–13 $\mu\text{mol/mol}$ madalamale kui troopilises vihmametsas (*Ibid.*). Samuti, madalamatelt ja suurematelt kõrgustelt mõõdetud kontsentratsioonide vahe (gradient) päeval ajal oli Prantsuse Guajaana vihmametsas sageli $> 200 \mu\text{mol/mol}$, parasvöötme lehtmetsades on see aga reeglina $< 100 \mu\text{mol/mol}$ (*Ibid.*). Buchmann *et al.* (1997) tuvastas samuti, et pärast vihmasedu (17,2 mm) toimus vihmametsas ca 1 tunni kestel vahetult maapinna kohal olevas õhukihis (0,10 m) CO₂ kontsentratsiooni langus 50 $\mu\text{mol/mol}$ võrra. Selle põhjuseks oli mulla hingamise vähenemine (Buchmann *et al.* 1997).

Tüüpilist boreaalse metsa CO₂ ööpäevast, aastaajalist ja aastatevahelist käiku on iseloomustanud Higuchi *et al.* (2003) Kanadas Põhja-Ontarios asuva Fraserdale'i (49°52' N, 81°37' W, 210 m üle merepinna) jaama 1990.–1996. a. andmete põhjal. Andmed mõõdeti 40 m kõrguselt maapinnast kasutades mittehajutatavat infapuna (*non-dispersive infrared*) meetodikat (*Ibid.*). Fraserdale jaam asub vähese inimõjuga piirkonnas (lähim 2500 elanikuga linn 70 km kaugusel) ning seda ümbritsevas metsas on peapuuliikideks

must kuusk ja pappel (Higuchi *et al.* 2003). Joonise 4 ülemises osas on lisaks Fraserdale jaama tunnistele CO₂ kontsentratsiooni väärtustele toodud võrdluseks silutud CO₂ väärtuste kõverad kolmest taustkontsentratsiooni mõõtvast jaamast (Alert 82°27' N, 62°31' W, Cape St. James 51°56' N, 131°01' W ja Cold Bay 55°12' N, 162°43' W) ning piirkonnas tehtud CO₂ lennumõõtmiste andmed. Joonise 4 alumises osas on suurendus 12.–22. juuni 1993. a. Fraserdale ja Alerti mõõtmistulemustest. Suveperioodi boreaalse metsa CO₂ kontsentratsiooni ööpäevane käik algab öösel, kui fotosüntees peatub ja toimub mulla ja taimede hingamisest tekkinud CO₂ akumulatsioon stabiilses öises piirikihis (*stable nocturnal boundary layer*) (Higuchi *et al.* 2003). Viimane kujuneb temperatuuri inversiooni tulemusena (Higuchi *et al.* 2003), mille käigus maapinna kohal olev õhk jahtub ja jääb külmaks, külma õhu kohal on aga päevasest ajast jäänud soe õhk (What are... 2017). CO₂ akumulatsioon kestab päikesetõusuni, mil algab fotosüntees, stabiilne õhukiht laguneb ja asendub turbulentsete voogudega, mille tulemusena CO₂ osakaal õhus (*mixing ratio*) järsult väheneb (Higuchi *et al.* 2003). Hästisegunenud õhuga planetaarne piirikiht ulatub ennelõunaks 1500–2000 m kõrgusele (*Ibid.*). Pealelõunasel perioodil konvektiivse õhukihi kõrgus enam oluliselt ei tõuse, ka fotosünteesi tempo muutub (*Ibid.*). Nende tegurite tulemusena CO₂ osakaal õhus stabiliseerub saavutatud tasemel ning püsib sellel „platool“ kuni päikese loojumiseni (*Ibid.*).



Joonis 4. Kanadas Põhja-Ontario Fraserdale jaamast perioodil 1990–1996 mõõdetud CO₂ tunni keskmised kontsentratsioonid (ülemine paneel, roheline joon). Võrdluseks on toodud piirkonna mõnede teiste jaamade silutud CO₂ väärtuste kõverad ja lennumõõtmiste tulemused. Alumisel paneelil on suurendus 12.–22. juuni 1993. a. Fraserdale CO₂ kontsentratsiooni ööpäevasest tsüklist. Võrdluseks on toodud Alerti jaama kontsentratsioonide silutud kõver (Higuchi *et al.* 2003)

Ilm mõjutab oluliselt päevadevahelisi ja aastatevahelisi varieeruvusi CO₂ ööpäevases käigus (Higuchi *et al.* 2003). Näiteks madalrõhkkonnaga kaasnev pilvine ja tuuline ilm põhjustab suvisesal kasvuhooajal väiksema amplituudiga ööpäevase tsükli (*Ibid.*). Higuchi *et al.* (2003) uuringu kohaselt mõjutavad boreaalse metsa hooajalist CO₂ käiku kõige enam laiuskraadist tulenev taimestiku kasvuperiood ja sellega kaasnev fotosünteesi mõju. Näiteks Fraserdales algab CO₂ kontsentratsiooni langus aprilli keskpaigas, põhjapool asuvates Alerti ja Cold Bay jaamades aga mai lõpus, hooajaline CO₂ kontsentratsiooni miinimum on Fraserdales 4 ppm võrra madalam kui Alertis ja Cold Bays, sesoonne miinimum on Fraserdales umbes 3 nädalat varem kui Alertis ja kasvuperioodi CO₂ väärtused on Fraserdales kõrgemad kui Alertis ja Cold Bays (*Ibid.*).

Eesti lähistel on CO₂ taustkontsentratsioone metsa ökosüsteemis uuritud Soomes. 1996. a. oktoobris alustati Põhja-Soomes Pallas-Ounastunturi rahvuspargis Sammaltunturi-nimelise tundramäe tipust CO₂ mõõtmisi LiCor NDIR (*non-dispersive infrared*) analüsaatoriga (Aalto *et al.* 2002). Pallase piirkond on väikese inim mõjuga ala boreaalse tsooni põhjapiiril (Aalto *et al.* 2002). Sammaltunturi mõõtejaamast (67°58' N, 24°07' E) 100 m allpoole jäävas segametsavööndis olid puuliikideks harilik mänd (*Pinus sylvestris*), harilik kuusk (*Picea abies*) ja sookask (*Betula pubescens*) (Aalto *et al.* 2002). Õhuproovid koguti 7 m kõrguselt maapinnast (Aalto *et al.* 2002). Üheminutistest 12 korda tunnis toimunud mõõtmistulemustest arvutati CO₂ 1 tunni keskmised kontsentratsioonid (Aalto *et al.* 2002). CO₂ ööpäevase, sesoonse ja aastatevahelise kõikumise analüüsiks kasutati nelja aasta mõõtmistulemusi (Aalto *et al.* 2002). Uuringu tulemusena tuvastati keskmine CO₂ kasvutrend 2,5 ppm/aastas ning umbes 19 ppm-ne erinevus aasta maksimum- ja miinimumkontsentratsiooni vahel (Aalto *et al.* 2002). CO₂ miinimumkontsentratsioonid mõõdeti Sammaltunturi jaamast juulis ja augustis (Aalto *et al.* 2002). Selge ööpäevane CO₂ tsükkel tuvastati Sammaltunturi jaamas juunist septembrini, mil miinimum- ja maksimumkontsentratsioonide vahe ulatus 5 ppm-ni (Aalto *et al.* 2002). Võrreldes Sammaltunturi jaama (560 m üle merepinna) andmeid madalamal asuva Kenttäröva jaama (330 m üle merepinna) andmetega tuvastati, et ööpäevaste kontsentratsioonide amplituud suureneb kõrguse vähenedes (Aalto *et al.* 2002). Seda põhjendati erineva (väiksema) taimestiku fotosünteesi ja ökosüsteemi hingamise mõjuga Sammaltunturi jaama asukoha atmosfääri piirikihi (*atmospheric boundary layer*) (Aalto *et al.* 2002). Atmosfääri piirikiht on alumine 1–2 km-ne osa atmosfäärist, mis on otseselt mõjutatud liikumise, soojuse ja veearu vahetusest Maa pinnaga (Kaimal, Finnigan 1994).

Sammaltunturi jaama CO₂ kontsentratsioone võrreldi ka teiste maailma atmosfääri mõõtejaamade andmetega. Selgus, et suviste miinimumkontsentratsioonide mõõtmised algasid Sammaltunturi jaamast umbes kuu aega varem kui merelist õhku mõõtvatest Ny Ålesundi (78°54' N, 11°54' E), Ocean Station „M“ (66°00' N, 2°00' E) ja Mace Head'i (53°19' N, 9°53' W) jaamades (Aalto *et al.* 2002). Võrreldes kontinentaalset õhku mõõtvate taustajaamadega Saksamaal (Schauinsland, 47°55' N, 7°55' E) ning Põhja-Itaalias (Monte Cimone, 44°11' N, 10°42' E) algas Sammaltunturi jaamas CO₂ kontsentratsioonide vähenemine kevadeti hiljem ja madalad kontsentratsioonid püsisid sügisel umbes 1 kuu võrra lühemat aega. Eelnimetatud erinevuste põhjustena on välja toodud Pallase piirkonna fotosünteesiliselt aktiivse perioodi hilisemat algust ja lühemat kestust, jääst vabanenud mere aktiveerumist CO₂ neeldajana ja mere fütoplanktoni tegevust (Aalto *et al.* 2002).

1.2.2. CH₄ kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis

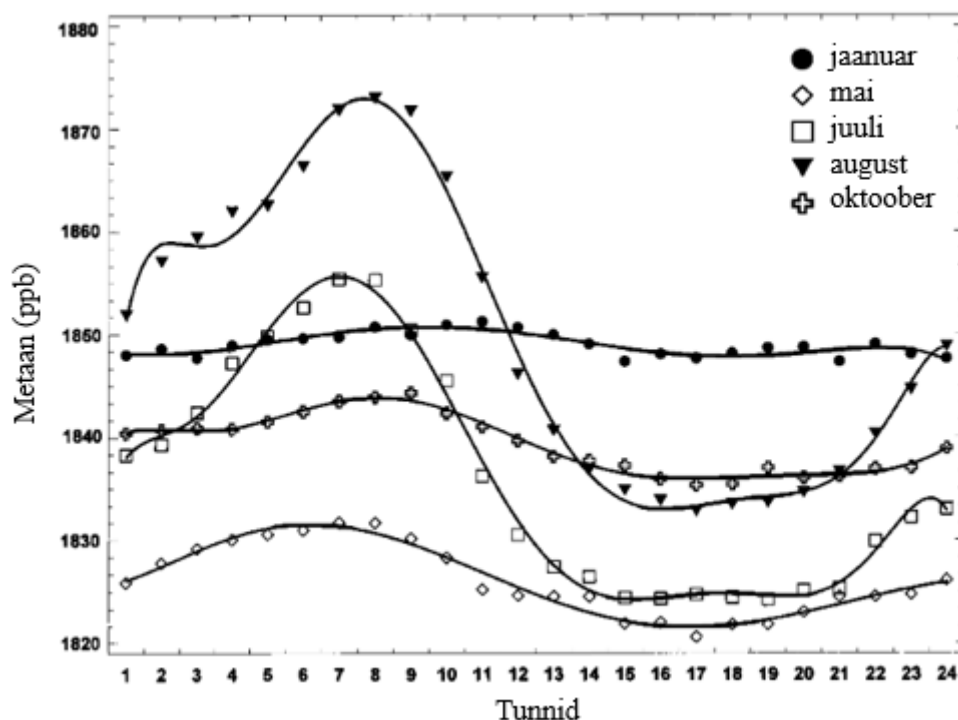
Senised metaani uuringud keskenduvad enamjaolt eesmärgile täpsustada erinevatest allikatest pärit metaani emissioone. Konkreetsete allikate metaani emissioonide kindlakstegemine on vajalik eelkõige atmosfääri süsinikuringe mudelite täpsustamiseks (Worthy *et al.* 1998). Täpsemaid emissiooni andmeid on vaja just kontinentaalse õhu osas ja põhjapoolkera keskmistelt laiuskraadidelt (Tans *et al.* 1996). Senised metaani osakaalu uuringud õhus on näidanud, et metaani osakaal õhus on väga varieeruv (Aalto *et al.* 2007) ega allu sellistele selgelt piiritletavatele protsessidele nagu näiteks CO₂ puhul on fotosüntees ja hingamine. Metaani kontsentratsiooni mõõtmiskoha õhus mingil ajahetkel võivad mõjutada üheaegselt nii lokaalsed kui geograafiliselt kaugel asuvad ehk regionaalsed biogeensed ja/või mittebiogeensed allikad. Üheks suureks metaani biogeenseks allikaks peetakse märgalasid, mida on suurtel pindaladel Põhja-Skandinaavias, Venemaal ja Kanadas (Aalto *et al.* 2007; Worthy *et al.* 1998). Looduslikud märgalad katavad maailmas umbes $5,5 \times 10^6$ km², millest umbes pool jäävad põhjapoolle 50° N (Matthews, Fung 1987; Aselmann, Crutzen 1989). Uuringute andmetel toimub metaani emissioon nendelt märgaladelt tugeva sesoonse tsüklilisusega (Panikov, Dedysch, 2000; Heikkinen *et al.* 2002; Christensen *et al.* 2003; Friborg *et al.* 2003). Suviti märgaladelt toimuvad metaani vood on suurusel 60–150 mmol m⁻² h⁻¹ (Necki, Korus 2001 ref Necki *et al.* 2003). Põhja-Soomes Lompolojänkka märgala jaamast (67°59'50''

N, 24°12'33'' E, 269 m üle merepinna) 2005. a. tehtud metaani voogude uuringu kohaselt algasid metaani emissioonid juunis, jõudsid maksimumi juuli alguses ja hakkasid vähenema augustis (Aalto *et al.* 2007). Metaani kontsentratsiooni ennustamatust ajas ja ruumis näitab aga asjaolu, et samaaegselt kõrgete kontsentratsioonidega Lompolojängkä jaamas oli 6 km eemal asuvas Sammaltunturi jaamas metaani osakaal õhus madal (Aalto *et al.* 2007). Aastase metaani käigu kohta leiti Põhja-Soomes asuva Sammaltunturi jaama 2004–2005. a. metaaniuuringust järgmised tulemused (Aalto *et al.* 2007):

- metaani aastase käigu selgelt eristuvat mustrit ei tuvastatud;
- kuu keskmiste kontsentratsioonide amplituud aastases lõikes oli *ca* 40 ppb-d;
- kõrgeimad metaani osakaalud õhus aasta lõikes mõõdeti perioodil november kuni märts, madalaimad juunis ja juuli alguses;
- hilissuvel mõõdetud metaani osakaalud õhus olid suure varieeruvusega;
- juulis algas uus metaani osakaalude tõus õhus, mis võis olla tingitud üle 10 °C püsinud temperatuurist ja idasuunalistest õhumassidest.

Märgalade mõju metaani kontsentratsioonile peaks näitama ka Kanadas Ontarios asuva Fraserdale jaama mõõtmistulemused, kuna antud jaam asub Hudson Bay Lowlandi, 320 000 km²-se pindalaga märgala lõunapiiril. Worthy *et al.* (1998) analüüsis perioodil 1990–1996 Fraserdalest 40 ja 20 m kõrguselt maapinnast mõõdetud metaani väärtusi. Joonisel 5 on toodud metaani ööpäevane käik jaanuaris, mais, juulis, augustis, oktoobris Fraserdale 1990.–1996. a. tunni keskmiste andmete põhjal. Kokkuvõttes tegi Worthy *et al.* (1998) Fraserdale tulemuste põhjal metaani ööpäevase käigu kohta järgmised järeldused:

1. Metaani ööpäevane tsükkel sõltub aastaajast. Talvel on ööpäevane tsükkel vähemärgatav, mais hakkab ööpäevane metaani käik selgemalt välja kujunema ja tsükkel on maksimaalse amplituudiga augustis.
2. Suvel on ööpäevases tsüklis metaani osakaal õhus maksimaalne umbes kella 6-st 8-ni (kohaliku aja järgi), seejärel algab langus ja osakaal õhus on miinimumis umbes 16:00–18:00. Metaani osakaalu tõus öösel ja langus päeval on tingitud eelpool CO₂ kontekstis kirjeldatud inversioonist öösel ja inversiooni lagunemisest päeval päikesekiirguse mõjul.
3. CH₄ suvine ööpäevane käik on sarnane CO₂ omale, kuid metaani ööpäevane käik alates öisest akumulatsioonist algab mõned tunnid hiljem võrreldes CO₂-ga.



Joonis 5. Metaani ööpäevane käik jaanuaris, mais, juulis, augustis, oktoobris Fraserdale 1990.–1996. a. tunni keskmiste andmete põhjal (Worthy *et al.* 1998)

Lisaks kohalikele ja regionaalsetele biogeensetele või mittebiogeensetele metaani allikatele võivad metaani osakaalu õhus mõjutada meteoroloogilised tingimused. Näiteks tuule suunal ja tugevusel on oluline mõju teatud ajal ja kohas mõõdetavatele metaani kontsentratsioonidele (Worthy *et al.* 1998). Vaikse tuule ja sellest tuleneva temperatuuri inversiooni tingimustes võib metaani kontsentratsioon tõusta mitukümmend protsenti, kuid tuule suuna ja tugevuse muutudes langeb kontsentratsioon kiiresti tagasi „normaalsele“ tasemele (Arefev *et al.* 2016).

Enamjaolt on seniste uuringute eesmärgiks olnud tuvastada läbi kaugkande trajektoore uurimise metaani regionaalsed allikad. Regionaalse mastaabi uurimiseks sobivad paremini planetaarse piirikihi kõrgemad kihid, mis on vähem mõjutatud lokaalsetest metaani allikatest ja milles õhk on paremini segunenud (Berhanu *et al.* 2015). Seega üha rohkem kasutatakse metaani jt. atmosfääri gaaside regionaalse mõjuulatusega kontsentratsioonide (Andreae *et al.* 2015) ja dünaamikate uurimiseks mõõtmisi kõrgetest tornidest (*tall towers*) ehk tornidest kõrgusega üle 200 m (Winderlich *et al.* 2010).

Selleks, et mõõtmistulemustest eristada lokaalsete allikate mõjudega väärtused regionaalsete mõjudega väärtustest tuleb enne andmete analüüsimist mõõtmistulemused filtreerida. Kasutusel on erinevad andmete filtreerimise strateegiaid. Shuang-xi Fang *et al.* (2016) filtreerisid regionaalsete mõjudega andmete saamiseks Hiina Shangdianzi jaama 2009.–2013. a. mõõtmistulemustest välja: 1) öise aja mõõtmistulemused, kuna need võivad kajastada öise aja temperatuuri inversioonist tingitud kõrgeid kontsentratsioone lokaalsetest allikatest, 2) päevase aja mõõtmistulemused, mis jäid kohalike allikate suunast puhuvate tuulte suunda, 3) mõõtmistulemused, mis saadi ajal, mil tuule kiirus maapinnal oli $< 1,5$ m/s.

Metaani jt. „saastavate“ atmosfäärigaaside (nt. CO₂, CO) regionaalsete allikate tuvastamiseks püütakse kindlaks teha õhumasside liikumise trajektoorid nende gaaside mõõtmiskohta (*back trajectories*). Trajektoorid selgitatakse välja kasutades erinevaid mudeleid, nt. HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) (Fang 2016), FLEXTRA, Flexpart (Lopez 2015). Uuringud on näidanud, et põhjapoolkeral toimuvad talvised metaani kontsentratsioonide tõusud-langused samaaegselt teiste saasteainete (näiteks CO₂, musta süsiniku ehk BC (*black carbon*), lämmastikoksiidide) kontsentratsioonide tõusude-langustega (Aalto *et al.* 2007; Worthy *et al.* 1998). Kuna talveperioodi tõttu saab välistada emissioonid biogeensetest allikatest (CO₂ kontsentratsiooni talvel ei mõjuta fotosüntees), siis tehakse selle põhjal järeldus, et tegemist on kaugkandega mõõtmiskohta saabunud antropogeenset päritolu metaaniga (Aalto *et al.* 2007).

1.2.3. CO kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis

CO kontsentratsioon atmosfääris on ajas ja ruumis väga muutlik (Chi *et al.* 2013). Muutlikkuse peamine põhjus on antropogeensete CO allikate ebaühtlane jaotumine Maal (*Ibid.*). Esinevad erinevate aastate vahelised CO kontsentratsioonide erinevused ja sesoonsed erinevused (Wotawa *et al.* 2001). Põhjapoolekeral domineerivad CO emissioonid antropogeensetest allikatest just talviti, suviti on peamiseks CO allikaks lenduvate orgaaniliste ühendite (*volatile organic compounds*) oksüdatsioon (*Ibid.*). Uuringute andmetel mõjutavad suviseid põhjapoolkera CO kontsentratsioone atmosfääris boreaalse metsa põlengud Kanadas (Wotawa, Trainer 2000; Forster *et al.* 2001) ja Siberis

(Kasischke *et al.* 2005; Yurganov *et al.* 2005; Vasileva *et al.* 2011; Wotawa *et al.* 2001). Samuti mõjutavad põhjapoolkera CO kontsentratsiooni kontinentidevaheline ja üle kogu põhjapoolkera toimuv kaugkanne (Yurganov *et al.* 1999). Näiteks on hinnatud, et üle Vaikse ookeani toimuv kaugkanne võib suurendada CO kontsentratsioone USA lääneosas kuni 25% (Liang *et al.* 2004; Stohl *et al.* 2002).

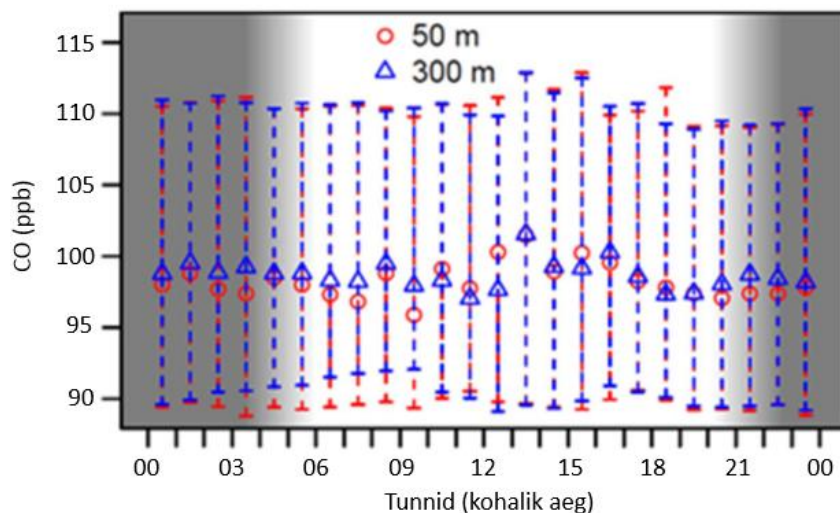
CO dünaamikat põhjapoolkera boreaalse metsa kohal on kirjeldanud Chi *et al.* (2013) Lääne-Siberis asuva Zotino jaama (60,80° N and 89,35° E, 114 m üle merepinna) 2006.–2011. a. mõõtmistulemuste põhjal. CO-d mõõdeti vaakum ultraviolet resonants floretsents tehnikat (*vacuum ultraviolet resonance fluorescence technique*) kasutades 50 ja 300 m kõrguselt iga 3 sekundi järel (Chi *et al.* 2013). Analüüsi 1 tunni keskmisi andmeid (*Ibid.*). Zotino jaama mõõtmistulemuste statistiline ülevaade on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Lääne-Siberist Zotino jaamast perioodi oktoober 2006 kuni detsember 2011 50 ja 300 m kõrguselt mõõdetud CO 1 tunni keskmiste kontsentratsioonide mediaan, ulatus, keskmine ja standardhälve, ppb (Chi *et al.* 2013)

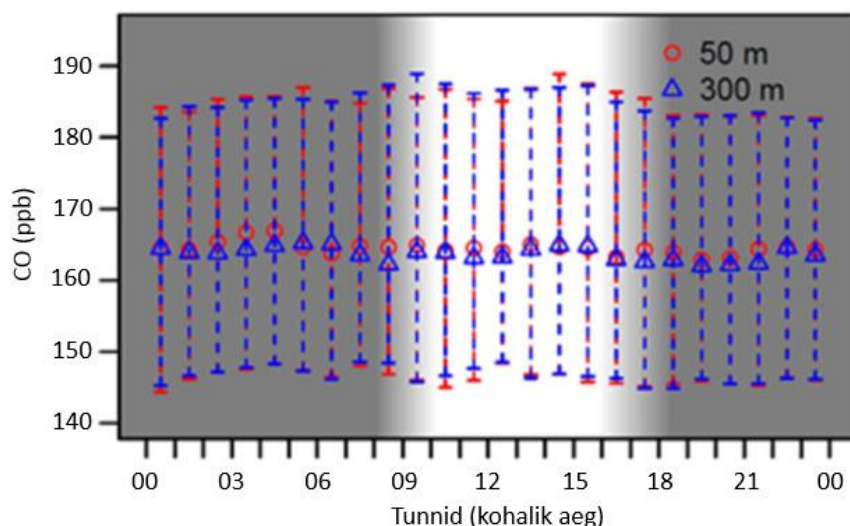
	50 m		300 m	
	mediaan (min–max)	keskmine±standard-hälve	mediaan (min–max)	keskmine±standard-hälve
CO	143,3 (80,06–920)	143,44±35,78	136,7 (80,01–810)	140,20±37,78

Zotino jaama mõõtmistulemuste põhjal võib CO signaalis eristada sesoonset käiku omavat taustkontsentratsiooni näitavat osa ja osa, mis lisandub taustsignaalile CO regionaalsetest emissiooniallikatest (Chi *et al.* 2013). Sesoonselt muutuv CO kontsentratsioon on maksimaalne hilistalvel jaanuaris-veebruaris ja minimaalne hilissuvel (*Ibid.*). Talviste kõrgemate kontsentratsioonide põhjusena on Chi *et al.* (2013) uuringus nimetatud troposfääri alumise osa kõrgemat staatilist stabiilsust (*higher static stability*) talvel ja talvisest kütteperioodist tulenevaid kõrgemaid inimtekkelisi CO emissioone. Suviseid madalamaid CO kontsentratsioonid on tingitud sellest, et suviti kiiremini toimuvate fotokeemiliste protsesside tõttu atmosfääris on CO eluiga (*lifetime*) suvel märksa lühem (Jaffe *et al.* 1998; Novelli *et al.* 1998).

Zotino andmete põhjal on CO ööpäevane dünaamika väga väike — osakaal õhus muutub ööpäeva jooksul väga vähe (Chi *et al.* 2013). Suvist ja talvist CO ööpäevast dünaamikat kujutavad joonised 6 ja 7. Joonistelt on samuti näha, et erinevatelt kõrgustelt mõõdetud tulemused üksteisest olulisel määral ei erine (*Ibid.*).



Joonis 6. CO osakaalu õhus ööpäevane käik suvel Lääne-Siberis asuva Zotino jaama 2006.–2011. a. ühe tunni keskmiste andmete põhjal (Chi *et al.* 2013)

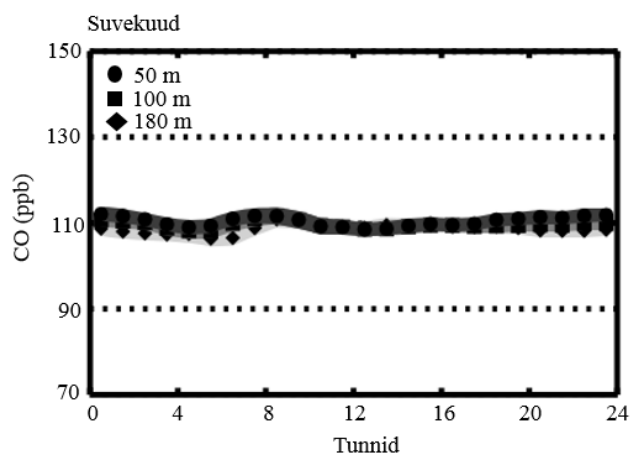


Joonis 7. CO osakaalu õhus ööpäevane käik talvel Lääne-Siberis asuva Zotino jaama 2006.–2011. a. ühe tunni keskmiste andmete põhjal (Chi *et al.* 2013)

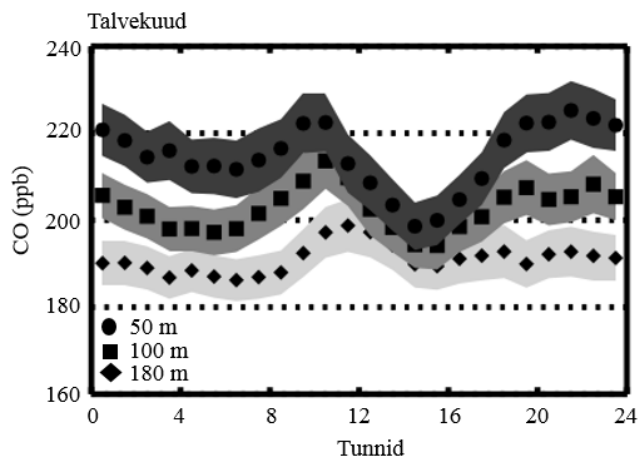
Yver *et al.* (2011) analüüsis perioodi oktoober 2008 kuni juuni 2010 CO mõõtmistulemusi Kesk-Prantsusmaal Orléans-i metsas asuvast Trainou jaama kõrgeast tornist (47°57'53'' N, 2°06'45'' E, 131 m üle merepinna). Kolmelt kõrguselt (50, 100,

180 m) saadi automatiseeritud gaasikromatograafia igas tunnis kahe õhuproovi tulemused (Yver *et al.* 2011). Uuringu tulemusena tuvastati Trainou jaama mõõtmistulemustest järgmised seaduspärasused (Yver *et al.* 2011):

1. Antropogeensete CO emissioonide ja atmosfääri piirikihi (*boundary layer*) kõrguse muutumise tõttu oli CO osakaal õhus (*mixing ratio*) maksimaalne talvel. CO osakaal õhus oli minimaalne suvel, kuna siis on maksimaalse tugevusega CO peamine neeldaja — CO reageerimine OH-radikaalidega.
2. Suvekuudel olid kolmelt erinevalt kõrguselt (50, 100, 180 m) saadud CO osakaalud õhus minimaalsete erinevustega (joonis 8). Talvekuudel oli gradient 50 ja 180 m mõõtmistulemuste vahel kuni 40 ppb-d. Gradienti sisuliselt ei olnud pärastlõunal mõõdetud tulemuste puhul, mil atmosfääri piirikiht ulatus kõrgele ja õhk oli selles ühtlaselt segunenud (joonis 9).



Joonis 8. CO keskmine ööpäevane dünaamika suvekuudel kolmelt erinevalt kõrguselt Trainou jaama 2008.–2010. a. mõõtmistulemuste põhjal (Yver *et al.* 2011)



Joonis 9. CO keskmine CO ööpäevane dünaamika talvekuudel kolmelt erinevalt kõrguselt Trainou jaama 2008.–2010. a. mõõtmistulemuste põhjal (Yver *et al.* 2011)

Trainou jaamaga samasugused seaduspärasused on tuvastatud paljudest teistest jaamadest, näiteks Šveitsi Beromünsteri jaama kõrgest tornist (47°11'23'' N, 8°10'32'' E, 797 m üle merepinna) (Satar *et al.* 2016), Ida-Poolas asuvast Bialystoki jaama kõrgest tornist 53°13' N, 23°01' E, 183 m üle merepinna) (Popa *et al.* 2010).

1.2.4. Veeauru (H₂O) kontsentratsioonid metsa ökosüsteemis

Veeauru dünaamikat atmosfääris (sh. metsa ökosüsteemis) käsitlevaid allikaid teaduskirjandusest ei leidud. Üldiselt võib öelda, et veeauru kontsentratsioon atmosfääris on väga muutlik nii ajas kui ruumis (Lagzi *et al.* 2013). Maapinna lähedal põhjustavad ajaliselt kõige kiiremaid muutusi kontsentratsioonis turbulents, tuule vertikaalse komponendi muutused ja aurustumine (Seidel 2003). Suurematel kõrgustel mõjutavad veeauru kontsentratsiooni minutite kuni tundide jooksul atmosfääri ebastabiilsusest tekkinud õhuvoolud, mis jaotavad veeauru laiali ja mõjutavad pilvede tekkimist (*Ibid.*). Sesoonsed muutused temperatuurides ja õhumasside liikumise mustrites põhjustavad veeauru kontsentratsioonide sesoonseid muutusi (*Ibid.*). Viimased on tugevamad põhjapoolkeral, kuna seal on rohkem vähem soojust akumul eeruvat (ja seetõttu kiiremaid ja tugevamaid temperatuuri kõikumisi põhjustavat) maismaad (*Ibid.*).

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Mõõtmiskohtade kirjeldus

2.1.1. Järvelja

Käesolevas töös kasutatud Järvelja CO₂, CH₄, CO ja H₂O kontsentratsioonid õhust on mõõdetud Järveljal (Tartu maakond, Meeksi vald) Järvelja Õppe- ja Katsemetskonnas asuvast 24 m kõrguselise tellingutornist (Liispõllu torn) 24 m kõrguselt maapinnast. Mõõtetorni ümbritsevad metsad ja sood. Järvelja Õppe- ja Katsemetskonna pindala on 10553 ha, millest metsamaad on 6626 ha ja soid on 3147 ha (Metsanduslik... 2017). Mõõtetorni asukohta (58°16'17,301'' N, 27°16'12,91'' E, 34,5 m üle merepinna) eraldisel kasvab Järvelja takseerandmete põhjal 40 aastane ca 17 m kõrgune keskealine mets, kus esimeses rindes domineerivad harilik kuusk (*Picea abies* (L.) Karst.) (80%) ja arukask (*Betula pendula* Roth.) (15%) (Kvartalite... 2017). Lisaks on esimeses rindes esindatud veel järgmised lehtpuuliigid: sanglepp (*Alnus glutinosa* L.), harilik haab (*Populus tremula* L.), hall lepp (*Alnus incana* (L.) Moench), harilik pärn (*Tilia cordata* Mill.), harilik saar (*Fraxinus excelsior* L.) (Noe *et al.* 2011). Puistus on ka teine rinne keskmise kõrgusega 6,4±0,6 m (*Ibid.*). Torni ümbritseva metsa kasvukohatuüp on jänese kapsa-mustika (*Ibid.*). Peamised alustaimestiku liigid torni ümbritsevas puistus on *Oxalis acetosella* (L.), *Vaccinium myrtillus* (L.), *Calamagrostis arundinacea* (L.), *Convallaria majalis* (L.) ja *Melampyrum pratense* (L.) (*Ibid.*). Torni piirkonna metsad paigutuvad nn. hemiboreaalsesse tsooni, mis on üleminekutsooniks põhjapool asuvale boreaalse ja lõunas paiknevale parasvöötme tsooni metsadele (Noe *et al.* 2012).

Torni piirkonna mullastik on tugevalt mõjutatud kõrgeleulatuvast põhjavee tasemest, mis on tingitud asukohast Peipsi järve alangul ja ümberkaudsetest suurtest märgaladest (Noe *et al.* 2011). Torni asukohas olev Haplic Gleysol (eutric) tüüpi muld on kõrge savisisaldusega, liigniiskusest põhjustatud gleitäppidega ja omab tüsedat toorhuumushorisonti keskmise paksusega 24 cm (Noe *et al.* 2011).

Piirkonna kliima on mõõdukalt jahe ja niiske, aasta keskmine õhutemperatuur on 4–6 °C, keskmine aastane sademete hulk on 500–750 mm (40–80 mm sellest lumena) (Noe *et al.* 2011). Piirkonna kliimat mõjutavad kontinentaalsed õhumassid Siberi tasandikelt, Põhja-Skandinaaviast, merelist mõju piirkonna kliimale avaldab Läänemeri ja Peipsi järv (Noe *et al.* 2016a). Taimede kasvuperiood (päevane õhutemperatuur on üle 5 °C) piirkonnas kestab 170–180 päeva (Noe *et al.* 2011). Peamiste lehtpuude pungad puhkevad aprilli lõpus, lehteminek toimub umbes mai keskpaigas ja lehtede närbumine oktoobri keskel (Noe *et al.* 2012).

Ca 6 km mõõtetornist põhjasuunda jääb Peipsiveere looduskaitseala (34 610 ha) (Kaitstavad... 2017). Tornist umbes 2 km kagusuunas asub Järvelja küla keskus ca 40 elanikuga (Noe *et al.* 2016a). Õhusaastet põhjustavat tootmisteggevust mõõdetorni ümbruses ei toimu. Mõõdetornile lähim eluhoone asub 173 m kaugusel. Tornist ca 50 m kaugusele jääb Kõnnu – Ahunapalu kruusakattega tee. Lähim suurem linn on 42 km kaugusel loodes paikev ca 93 000 elanikuga Tartu (Omavalitsusüksuste... 2016). Ca 79 km mõõtekohast kagusse jääb Pihkva linn umbes 205 000 elanikuga (Noe *et al.* 2016a). Nii Tartu kui Pihkva jäävad mõõtmiskohale saabuvatest peamistest tuule suundadest väljapoole (*Ibid.*).

2.1.2. Hyytiälä

Eesti oludele sarnaseima ja lähima võrdlusjaamana kasutati käesolevas töös Lõuna-Soomes asuva Hyytiälä SMEAR II (*Station for Measuring Forest Ecosystem-Atmosphere Relations*) jaama (61°51' N, 24°17' E, 181 m üle merepinna) 72 m kõrgusest tornist 16,8 m kõrguselt mõõdetud CO₂, CH₄, CO ja H₂O andmeid (Kulmala *et al.* 2001). Torn asub homogeenses umbes 45-aasta vanuses männi (*Pinus sylvestris* L.) puhtpuistus, milles puude tihedus on 2500 puud hektari kohta (*Ibid.*). Torni ümbritsevas puistus on vaid 1% ulatuses muid puuliike — sookaske (*Betula pubescens*), halli leppa (*Alnus incana*) ja harilikku haaba (*Populus tremula*) (*Ibid.*). Alustaimestiku liikideks on kanarbik (*Calluna vulgaris*), harilik pohl (*Vaccinium vitis-idaea*) ja harilik mustikas (*Vaccinium myrtillus*) (*Ibid.*). Aasta keskmine temperatuur Hyytiäläs on 3 °C ja aastane sademete hulk on 700 mm (*Ibid.*). Domineerivad tuuled Hyytiälä jaamas puhuvad läänekaarest. Enam kui 25% aastasest õhumasside hulgast, mis Hyytiälässe saabuvad on pärit Atlandilt või on

kulgenud üle Suurbritannia (Sogacheva *et al.* 2005), 20–25% õhumassidest pärinevad Arktikast või Põhja-Atlandilt (Lyubovtseva *et al.* 2005). Hyytiälät ümbritsevad peamiselt männi-enamusega metsad suurtel aladel. Suurim linn Hyytiälä SMEAR II jaamast on umbes 60 km edelasse jääv *ca* 200 000 elanikuga Tampere (Kulmala *et al.* 2001). Jaamast *ca* 1 km edelasse jääb keskmise liiklustihedusega maantee Orivesilt Laupuisse, mida Hyytiälä lõigus läbib keskmiselt 1710 sõidukit ööpäevas (Traffic 2017).

2.1.3. Mauna Loa

Võrdlusjaamana kasutati ka Hawaii saarel asuva Mauna Loa jaama (19,5° N, 155,6° E, 3397 m üle merepinna) 40 m kõrguselt maapinnast mõõdetud CO₂, CH₄ andmeid. Mauna Loa jaam asub 4170 m kõrguse samanimelise aktiivse vulkaani põhjaküljel (Sharma, Barnes 2016). Viimane Mauna Loa purse toimus 1984. aastal ja jaam asub umbes 6 km kaugusel selle kaldeerast (Ryan 2001). Mauna Loa vulkaani naabruses, põhjas, asub suikuvast olekus vulkaan Mauna Kea kõrgusega 4205 m (Sharma, Barnes 2016). Mauna Loa jaama asukoha kõrgusest ja eraldatusest (keset Vaikset ookeani) tingituna kajastavad Mauna Loa jaama mõõtmistulemused taustkontsentratsioone (Ryan 2001; Hyslop *et al.* 2013).

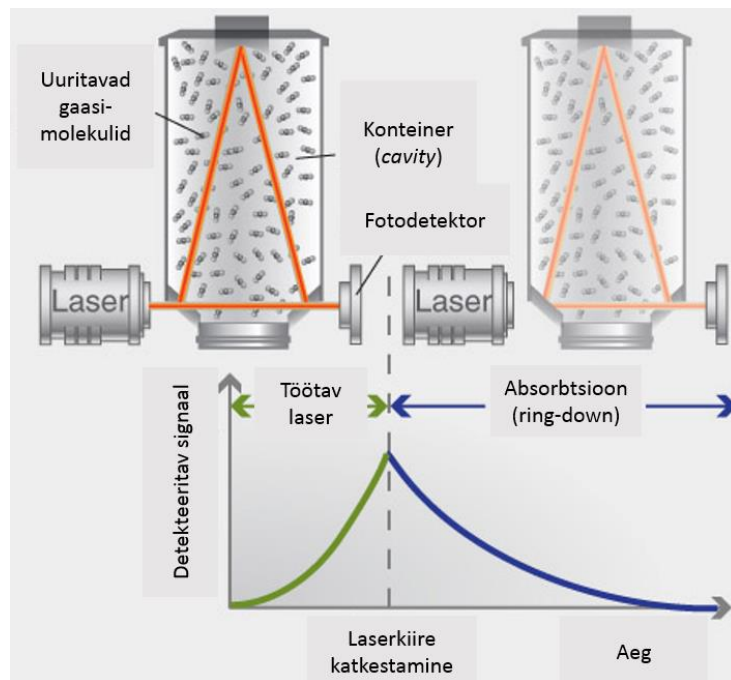
2.1.4. Jungfraujoch

CO puhul kasutati võrdlusjaamana Šveitsi Alpides asuva Jungfraujoch jaama (46°32' N 7°59' E, 3580 m üle merepinna) andmeid. Enamasti toimib jaam taustajaamana, kuna suure kõrguse tõttu analüüsitakse õhku planetaarsest piirikihist kõrgemal (Schibig *et al.* 2016). Teatud ilmastikutingimuste korral võivad jaama mõõtmistulemusi mõjutada siiski ka planetaarse pinnakihi õhk allpool asuvatest inimtegevusest mõjutatud orgudest ja reostuskoormus kaugkandega (*Ibid.*).

2.2. Andmete kogumine ja töötlemine

Järvselja CO₂, CH₄, CO ja H₂O osakaalude andmed õhust olid kogutud nn. *cavity ring-down spectroscopy* mõõteprintsipi kasutava analüsaatoriga Picarro G2401. *Cavity ring-down spectroscopy* mõõteprintsipi puhul arvutatakse uuritavate gaaside osakaalud õhus

lähitudes kinnisesse konteinerisse (*cavity*) suunatud vajaliku lainepikkusega laserkiire absorbeerumise (*ring-down*) kiirusest pärast laserkiire järsku katkestamist (joonis 10) (Cavity... 2017). *Cavity ring-down spectroscopy* mõõteprintsipi suure täpsuse ja detekteerimisvõime tagab laserkiire paljukordne (kuni 100 000 korda) peegeldumine konteineris peale laserkiire katkestamist, mille käigus laserkiire teekond kujuneb ainult 25 cm pikkusega konteineris umbes 20 km pikkuseks (*Ibid.*).



Joonis 10. Skemaatiline *Cavity Ring-Down Spectroscopy* mõõteprintsipi tööpõhimõte Picarro G2401 analüsaatoris (Cavity... 2017)

Järvseljal kasutatud Picarro G2401 analüüsib gaase pidevas režiimis ja registreerib iga ca 1–3 sekundi järel näidud järjest CO_2 , CH_4 , CO ja H_2O kohta. Konkreetse uuritava gaasi kohta saadakse mõõtmistulemus umbes iga 3–6 sekundi järel.

Analüsaatori poolt registreeritud parameetritest kasutati käesolevas töös CO_2 , CH_4 , CO näitusid, mis olid seadme poolt korrigeeritud kuivale õhule (*mole fraction in dry air*) ja väljendatud ühikutes ppmv (*part per million by volume*). Kuiva õhu kohta esitatud tulemustest on eemaldatud veeauru lahjendav mõju, kuna veeauru osakaal atmosfääris on väga muutlik ja veeauru mõju arvestamata jätmine ei võimaldaks maailma erinevate geograafiliste piirkondade mõõtejaamade tulemusi omavahel võrrelda (Tans, Thoning

2008). Samuti kasutati käesolevas töös analüsaatori poolt registreeritud H₂O näitused väljendatuna mahuprotsentides percentv (*percent by volume*).

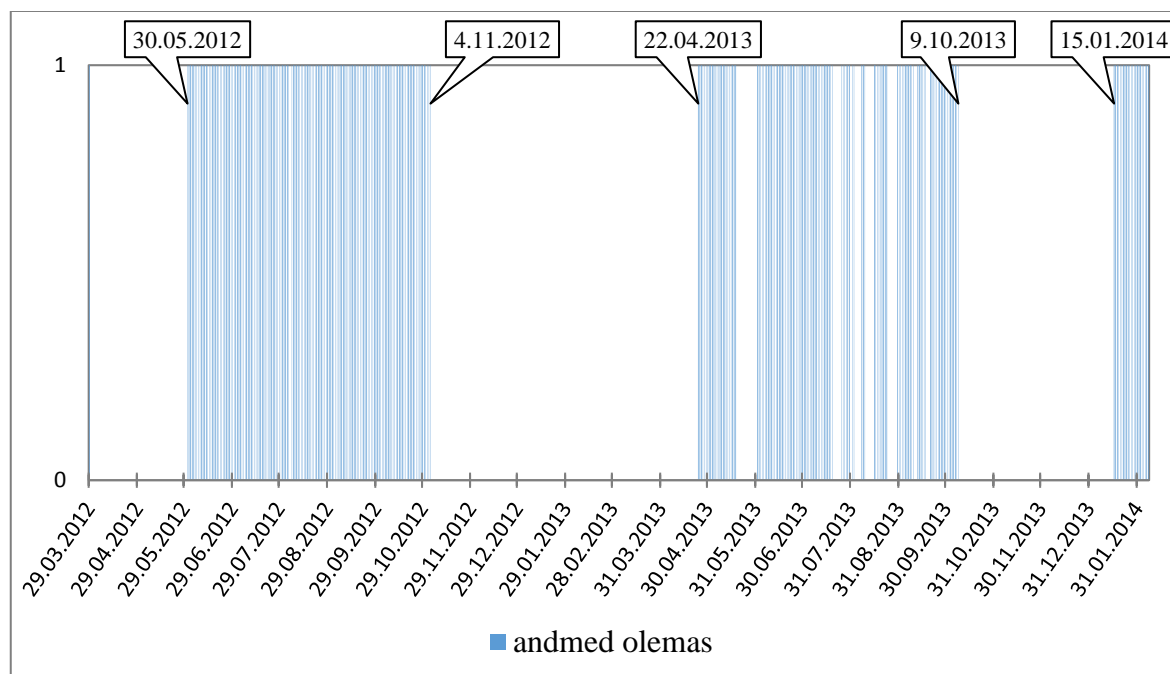
Järvselja mõõtmistulemused saadi süsteemist .DAT tüüpi failidena, üldjuhul igas failis ühe ööpäeva andmed. Kasutati perioodil 29.03.2012–7.02.2014 tehtud mõõtmiste tulemusi. Selle perioodi Järvselja mõõtmistulemused olid 7052 andmefailis. Joonisel 11 on toodud tekstiredaktoriga Notepad avatud andmefaili näide.

DATE	TIME	FRAC_DAYS_SINCE_JAN1	FRAC_HRS_SINCE_JAN1	JULIAN_DAYS	EPOCH_TIME
2012-06-04	01:01:36.131	155.12611263	3723.026703	156.12611263	1338771696.131
2012-06-04	01:01:36.907	155.12612161	3723.026919	156.12612161	1338771696.907
2012-06-04	01:01:37.140	155.12612431	3723.026983	156.12612431	1338771697.140
2012-06-04	01:01:37.585	155.12612947	3723.027107	156.12612947	1338771697.586
2012-06-04	01:01:38.572	155.12614088	3723.027381	156.12614088	1338771698.572
2012-06-04	01:01:39.388	155.12615034	3723.027608	156.12615034	1338771699.389
2012-06-04	01:01:39.615	155.12615296	3723.027671	156.12615296	1338771699.616
2012-06-04	01:01:40.071	155.12615823	3723.027798	156.12615823	1338771700.071
2012-06-04	01:01:41.099	155.12617014	3723.028083	156.12617014	1338771701.100
2012-06-04	01:01:41.882	155.12617920	3723.028301	156.12617920	1338771701.883
2012-06-04	01:01:42.117	155.12618191	3723.028366	156.12618191	1338771702.117
2012-06-04	01:01:42.559	155.12618703	3723.028489	156.12618703	1338771702.559
2012-06-04	01:01:43.572	155.12619875	3723.028770	156.12619875	1338771703.572
2012-06-04	01:01:44.384	155.12620815	3723.028996	156.12620815	1338771704.384
2012-06-04	01:01:44.621	155.12621090	3723.029062	156.12621090	1338771704.622
2012-06-04	01:01:45.069	155.12621608	3723.029186	156.12621608	1338771705.069
2012-06-04	01:01:46.066	155.12622763	3723.029463	156.12622763	1338771706.067
2012-06-04	01:01:46.868	155.12623690	3723.029686	156.12623690	1338771706.868
2012-06-04	01:01:47.098	155.12623956	3723.029749	156.12623956	1338771707.098
2012-06-04	01:01:47.546	155.12624476	3723.029874	156.12624476	1338771707.547
2012-06-04	01:01:48.532	155.12625616	3723.030148	156.12625616	1338771708.532
2012-06-04	01:01:49.319	155.12626528	3723.030367	156.12626528	1338771709.320
2012-06-04	01:01:49.569	155.12626817	3723.030436	156.12626817	1338771709.570
2012-06-04	01:01:50.043	155.12627366	3723.030568	156.12627366	1338771710.044
2012-06-04	01:01:51.036	155.12628514	3723.030843	156.12628514	1338771711.036
2012-06-04	01:01:51.825	155.12629449	3723.031066	156.12629449	1338771711.826

Joonis 11. Picarro G2401 mõõtesüsteemist saadud Järvselja andmefaili sisu näide (joonisel näha ainult osad veerud)

Järvselja andmete töötluse esimese sammuna koondati nende 7052 andmefaili sisu ühte faili. Selleks kirjutati skriptid programmeerimiskeeles Python (versioon 3.4.3) Jupyter Notebook keskkonnas (lisa 1). Saadud koondfailis oli kokku 28 583 732 kirjerida. Järgnev andmetöötlus toimus Jupyter Notebook keskkonnas kasutades Pythoni andmeanalüüsi moodulit *pandas*. *Pandas* kirjutatud skriptide abil eemaldati Järvselja andmete koondfailist üksikute failide kokkuliitmisest jäänud korduvad veerupealkirjad, moodustati igast uuritava gaasi mõõtmistulemustest eraldi andmerea fail, mis koosnes mõõtmise kuupäevast, millisekundilise täpsusega mõõtmise kellaajast, analüsaatori poolt antud staatusest väärtusele ja uuritava gaasi väärtustest. Seejärel eemaldati *pandas* abil andmerea failidest vigased mõõtmistulemused (kus väärtuseks oli null või negatiivne arv või ületas kontrollpiire) ning sorteeriti tulemused mõõtmise aja järgi alustades varasemast ajast. Viimase sammuna agregeeriti *pandas* abil seni 3–6 sekundilise intervalliga mõõtmistulemused 30 minuti aritmeetiliseks keskmiseks, mediaaniks ja standardhälbeks. Enne agregeerimist oli CO₂ kohta 7 125 955 väärtust, CH₄ kohta 7 096 866 väärtust, CO kohta 7 154 227 väärtust ja H₂O kohta 7 096 311 väärtust.

Uuritud periood ei olnud tervikuna Järvelja ööpäevaste andmetega kaetud. Pikimad ajavahemikud, mille kohta andmed puuduvad on 30.03.2012–30.05.2012, 4.11.2012–22.04.2013 ja 9.10.2013–15.01.2014 (joonis 12).



Joonis 12. Uurimisperioodi 29.03.2012–7.02.2014 kaetus kasutatavate Järveljalt mõõdetud CO₂, CH₄, CO ja H₂O kontsentratsioonide andmetega

Hyytiälä SMEAR II jaama automaatanalüsaatorite pidevmõõtmiste CO₂, CH₄, CO ja H₂O ööpäevased andmed saadi Soome teaduse avaandmete portaalist AVAA (Smart-SMEAR 2017). Andmed on mõõdetud automaatanalüsaatoritega Li-Cor LI-840 ja Picarro G2401. Algandmestikus oli iga uuritava gaasi kohta mõõtmistulemus *ca* iga 7 minuti järel. Algandmestiku põhjal arvutati Pythoni andmeanalüüsi moodulit *pandas* kasutades poole tunni keskmised ja standardhälve. Enne keskmiste arvutamist oli iga gaasi kohta *ca* 100 000–150 000 väärtust.

Mauna Loa jaama automaatanalüsaatorite pidevmõõtmiste CO₂, CH₄ tunni keskmised andmed saadi *USA National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) veebilehelt. Andmete autoriteks/koostajateks on CO₂ puhul K. W. Thoning, D. R. Kitzis ja A. Crotwell (Thoning *et al.* 2015) ja CH₄ puhul E. J. Dlugokencky, A. M. Crotwell, P. M. Lang, J. W. Mund (Dlugokencky *et al.* 2017). UTC-s esitatud mõõtmise aeg teisendati Mauna Loa kohalikku aega.

Jungfraujoch jaama automaatanalüsaatorite (Horiba ja Piccarro) pidevmõõtmiste tunni keskmised CO andmed saadi *Global Atmosphere Watch World Data Centre for Greenhouse Gases* veebilehelt (CO Jungfraujoch... 2017). Jungfraujochi CO andmete koostajateks/autoriteks on B. Buchmann, T. Seitz ja M. Steinbacher (*Ibid.*).

Järvelja, Hyytiälä, Mauna Loa, Jungfraujoch andmetest graafikute joonistamiseks kasutati programmi Microsoft Excel 2013. Mõõtmistulemuste põhjal selgitati CO₂, CH₄, CO ja H₂O ööpäevane, sesoonne ja aastane dünaamika. Sesoonse dünaamika selgitamiseks võrreldi suve ja sügist ning selleks kasutati ühe suvekuu (juuni) ja ühe sügiskuu (oktoober) andmeid. Need kuud valiti kriteeriumi alusel, et kõikidest uuritud jaamadest oleks vähemalt kahe aasta kohta uuritavate kuude kohta andmed olemas. Kuna 2013. a. oktoobris tehti Järveljal mõõtmisi vaid perioodil 1.–8. oktoober, siis on 2013. a. oktoobrit käsitlevatel joonistel esitatud ka 2013. a. Järvelja septembrikuu mõõtmistulemused. Aastase dünaamika selgitamiseks võrreldi 30 minuti või 1 tunni aritmeetilistest keskmistest arvatud kuude aritmeetilisi keskmisi.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. CO₂ sesoonne ja ööpäevane dünaamika

Järvelja ja Hyytiälä 30 minuti ning Mauna Loa ühe tunni aritmeetilised keskmised CO₂ osakaalud õhus on toodud joonisel 13. Lisaks kujutatakse joonisel 13 eelnimetatud algandmete põhjal arvatud kuu aritmeetilisi keskmisi kontsentratsioone. Erinevate uuringute põhjal on näidatud, et CO₂ kontsentratsioonil on sesoonne käik, mida põhjustavad maismaa CO₂ allikate ja neeldajate osatähtsuse muutumine sesooniti ja hooajalised muutused atmosfäärse tsirkulatsiooni muustrites (Popa *et al.* 2010). Suvekuudel, kui toimub aktiivne fotosüntees taimestiku poolt on CO₂ kontsentratsioonid aasta lõikes miinimumis ja talvekuudel, kui ülekaalus on hingamine on CO₂ maksimaalsel tasemel aastas (Higuchi *et al.* 2003; Sidorov *et al.* 2002; Haszpra 1995; Berhanu *et al.* 2015, Satar *et al.* 2016). Näiteks Popa *et al.* (2010) tuvastas Poola Bialystoki jaama andmete põhjal, et CO₂ sesoonses tsüklis on miinimum augustis ja maksimumid on detsembris ning veebruaris, märtsis. Jooniselt 13 on kuu keskmiste kontsentratsioonide

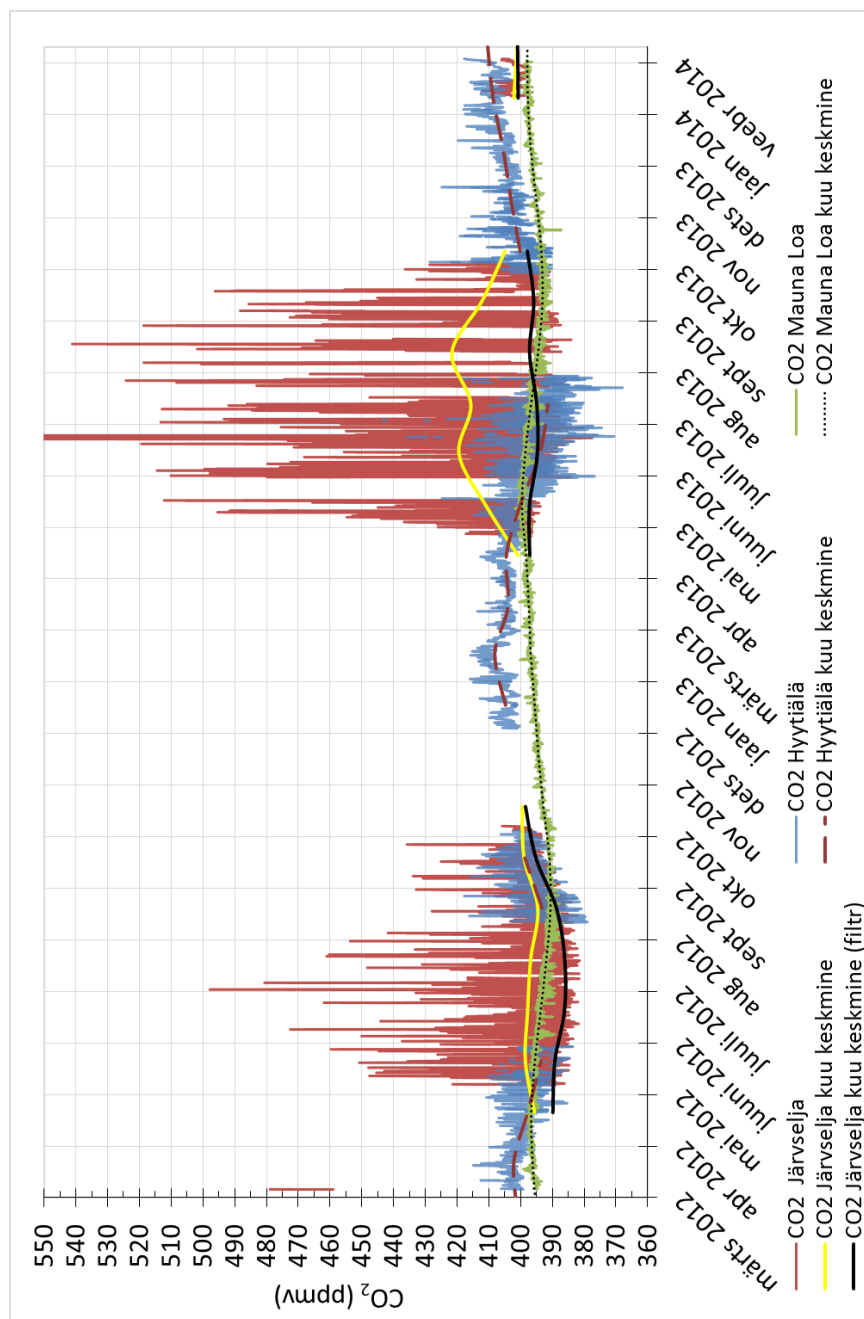
põhjal näha CO₂ sesoonne kõik miinimumiga suvekuudel ja maksimumiga talvekuudel Hyytiäläs ja Mauna Loal. Järvelja puhul selline sesoonsus kogu ööpäeva poole tunni keskmistest arvatud kuu keskmisest aritmeetilisest keskmisest välja ei paista. Põhjus on suvekuude mõõtmistulemuste suures amplituudis ööpäeva jooksul. Suvised miinimumiga sesoonsuse väljatoomiseks on Järvelja puhul joonisel 13 kujutatud ka kella 12:00–16:00 poole tunni keskmistest arvatud kuu aritmeetilised keskmised. Pealelõunased CO₂ kontsentratsioonid iseloomustavad CO₂ taset hästisegunenud õhus.

2012. ja 2013. a. juuni CO₂ kontsentratsiooni ööpäevane kõik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 14 ja 15. Jooniste algandmed on antud lisas 2. Joonistelt ilmneb, et mõlema aasta Järvelja juuniku ööpäevane CO₂ kõik on absoluutväärtuste erinevusele vaatamata väga sarnane. Tsükli algusest keskööl kuni kella kahe-kolmeni öösel on CO₂ osakaal õhus ööpäeval maksimaalsel tasemel. Sellel ajal ületab CO₂ osakaal õhus oluliselt globaalset taustkontsentratsiooni mõõtvat Mauna Loa CO₂ taset. Näiteks 2013. a. 2:15 oli Järveljal CO₂ osakaal õhus 464,3 ppmv-d, samas kui Mauna Loal oli vastav väärtus 398,7 ppmv-d (vahe seega 65,6 ppmv-d). 2012. aastal öised väärtused Järveljal ja Mauna Loal nii palju ei erine — kell 1:15 on väärtuste vahe 21,2 ppmv-d. Suurusjärgude hindamiseks olgu nimetatud, et viimastel aastatel on globaalne CO₂ kontsentratsiooni tõus olnud 2–3 ppmv-d aastas (Dlugokencky, Tans 2017). Öösel on ööpäeval maksimaalsel tasemel CO₂ kontsentratsioonid ka Hyytiäläs, kuid erinevalt Järveljast on kõrged tasemed mõnevõrra hiljem — umbes kella kahest-viieni öösel. Hyytiälä maksimaalsed CO₂ tasemed jäävad samuti madalamale Järvelja maksimaalsetest tasemetest — 2012. a. juunis 15,5 ppmv võrra, 2013. a. juunis 58,3 ppmv võrra. Järvelja kõrgema CO₂ öise akumulatsiooni põhjuseks võrreldes Hyytiäläga on tõenäoliselt jaama ümbritseva puistu tihedam võrastik ning sellest tingitud puistu halvem ventileeritavus. Samuti on Järveljal tusedam metsamulla kiht, mis põhjustab suuremaid CO₂ voogusid mullast. Järvelja öisele CO₂ kontsentratsiooni kõrgele tasemele järgneb järsk langus, mis 2012. a. juunis saab alguse 2:15 ja 2013. a. juunis 2:45. Ööpäevases tsüklis öised maksimaalsed CO₂ kontsentratsioonid on kindlaks tehtud paljude uurijate poolt, näiteks Haszpra (1995), Yang *et al.* (1999), Winderlich *et al.* (2010), Wu *et al.* (2012), Han *et al.* (2003), Buchmann *et al.* (1997). Nende uuringute põhjal saavutab CO₂ kontsentratsioon maksimumi vahetult enne päikesetõusu (Wu *et al.* 2012; Haszpra 1995; Winderlich *et al.* 2010; Higuchi *et al.* 2003). Põhjuseks on asjaolu, et kuni päikesetõusuni

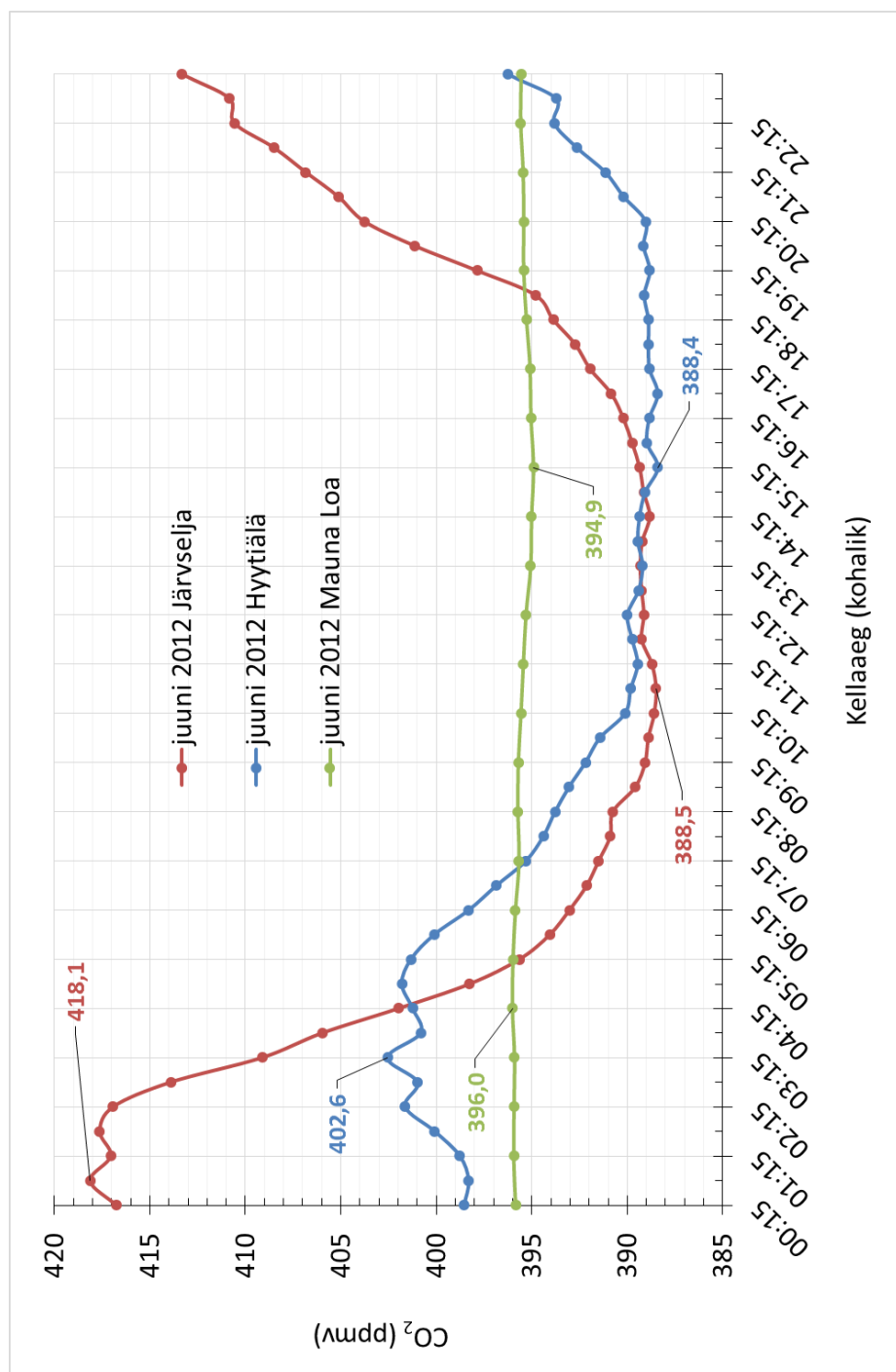
toimub taimede ja mulla hingamine, mille tulemusena vabanenud CO₂ aga akumuleerub inversiooni tulemusena maapinnalähedases õhukihis (Winderlich *et al.* 2010; Higuchi *et al.* 2003). Päikesetõusuga kaasneb maapinna soojenemine, õhu vertikaalse segunemise taastumine kõrgemate kihtidega (Winderlich *et al.* 2010; Vermeulen *et al.* 2011). Järveljal saab mõõdetud tulemuste põhjal kontsentratsiooni järsk langus alguse märksa varem (1,5–2 tundi) enne päikesetõusu, mis on seega mõnevõrra erandlik ja mille põhjused vajaksid väljaselgitamist. Järveljal kestab juunis kontsentratsiooni langus varase ennelõunani saavutades ööpäevase tsükli miinimumi 2012. a. kell 10:45 (388,5 ppmv) ja 2013. a. kell 11:45 (391,6 ppmv). Ennelõunast kuni umbes kella 15–16-ni püsivad Järvelja juunikuu CO₂ kontsentratsioonid enam-vähem samal tasemel stabiilsena. CO₂ kontsentratsiooni järsku langust suvekuudel alatest päikesetõusust kuni keskpäevani ning sellele järgnevat kontsentratsiooni stabiliseerumist madalal tasemel kirjeldavad ka näiteks Wu *et al.* (2012) ja Winderlich *et al.* (2010). Päevane platoo tuleneb sellest, et keskpäevaks on fotosüntees ja õhu segunemine planetaarses piirikihis saavutanud oma maksimaalse taseme (*Ibid.*). Erinevate autorite (Higuchi *et al.* 2003; Winderlich *et al.* 2010) töödest selgub, et suvine päevane CO₂ „platoo“ kestab kuni päikeseloojanguni, mil fotosüntees lakkab, maapinnalähedastes kihtides kujuneb stabiilne öine piirikiht (*stable nocturnal boundary layer*) ja viimases hakkab CO₂ akumuleeruma. Järvelja 2012. ja 2013. a. juuni mõõtmisandmed näitavad aga, et CO₂ kontsentratsioon hakkab taas tõusma märksa varem (umbes kell 15–16) enne päikese loojumist (juunis umbes kell 22). Sellise erinevuse põhjus Järvelja kontsentratsiooni käigus vajaks väljaselgitamist. Pärast öist maksimumi langevad juuni CO₂ kontsentratsioonid 2012. ja 2013. a. Hyytiäläs kuni umbes kella 13ni ning seejärel stabiliseeruvad saavutatud tasemel kuni umbes kella 19–20-ni. Seega, võrreldes Järveljaga saavutatakse päevane minimaalne CO₂ kontsentratsiooni tase mõnevõrra hiljem ja see püsib madala taseme platool kauem ning hilisema ajani. Päeval madala CO₂ taseme „platoo“ ajal on Hyytiälä ja Järvelja kontsentratsioonid 2012. a. juunis peaaegu võrdsete absoluutväärtustega — ca 389 ppmv-d.

2012. ja 2013. a. oktoobri CO₂ kontsentratsiooni ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 16 ja 17. Jooniste algandmed on antud lisas 2. Iga kellaaja kohta Järveljal oli 2012. a. oktoobris enne keskmistamist 27–29 erineva kuupäevaga väärtust. 2013. a. oktoobris toimusid Järveljal mõõtmised üksnes perioodil

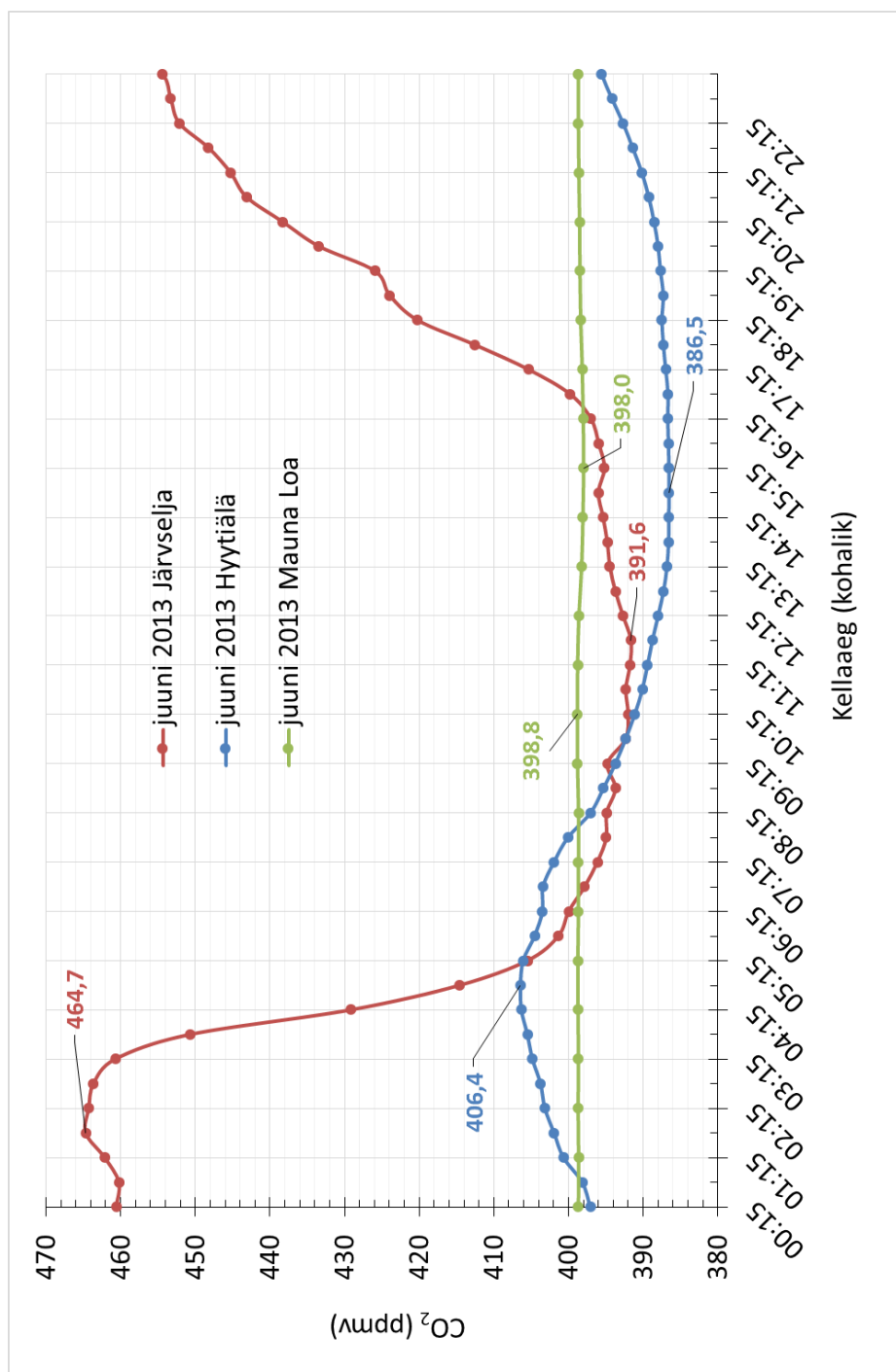
1.–8. oktoober, mistõttu on kellaaegade kaupa (6–8 väärtust kellaaja kohta) keskmistatud üksnes selle perioodi väärtused. Joonistelt ilmneb, et CO₂ ööpäevane käik Järveljal on oktoobris sarnane juuni omale, kuid oktoobris on ööpäevase kontsentratsiooni amplituud väiksem. CO₂ kontsentratsiooni väiksem amplituud sügiskuu perioodil on tuvastatud ka teiste uurijate poolt (nt Haszpra (1995); Higuchi *et al.* 2003) poolt. Näiteks kui juunis 2012 oli Järvelja miinimum ja maksimumkontsentratsioonide vahe ehk ööpäevane amplituud 29,6 ppmv-d, siis oktoobris 2012 oli see ainult 8,5 ppmv-d. 2012. a. oktoobri Järvelja ja Hyytiälä CO₂ ööpäevane käik on väga sarnane ehkki Järveljal algab kontsentratsiooni langus öiselt kõrgelt tasemelt ja päevane kontsentratsiooni tõus päevaselt madalalt tasemelt umbes paar tundi varem. Seega võib 2012. a. tulemuste põhjal öelda, et Järvelja ja Hyytiälä metsa ökosüsteemis toimivad sügisel CO₂ siduvad ja vabastavad protsessid võrreldava võimsusega. Põhjus võib olla selles, et oktoobriks on võrastiku tihedus ja fotosünteesi aktiivsus nii Järveljal kui ka Hyytiäläs muutunud ühetaoliseks — Järveljal on esimese ja teise rinde lehtpuude lehed langenud, puistu ventileeritavus on sarnane Hyytiälä omale. Oktoobri ööpäevane amplituud on võrreldes juuniga väiksem, kuna selles on põhiline osakaal pinnase ja taimestiku hingamisel mitte enam fotosünteesi aktiivsusel (Sidorov *et al.* 2002). Madalad õhutemperatuurid ja väike valguse intensiivsus alandavad sügisel ja talvel fotosünteesi aktiivsust (Norisada *et al.* 1998). Olulise erinevusena võrreldes juunikuuga jääb nii Järvelja kui Hyytiälä päevane kontsentratsiooni miinimumtase kõrgemale globaalse taustajaama Mauna Loa tasemest (2–4 ppmv võrra). See viitab sellele, et Järveljal ja Hyytiäläs on sel aastaajal metsa ökosüsteemis ülekaalus CO₂ emissioonid mitte neeldumine. 2013. a. oktoobri Järvelja CO₂ oktoobri ja septembri ööpäevase käigu amplituudid (vastavalt 18,3 ja 36,4 ppmv) on kõrgemad kui 2012. a. oktoobri amplituud (8,5 ppmv), samas kui 2013. a. Hyytiälä oktoobri amplituud (7,3 ppmv) on sarnane 2012. a. Hyytiälä amplituudile (7,8 ppmv). Järvelja oktoobrikuist võrdlemisi heitlikku CO₂ ööpäevast käiku võib seletada sellega, et kasutada oli vaid oktoobri kaheksa esimese päeva tulemused.



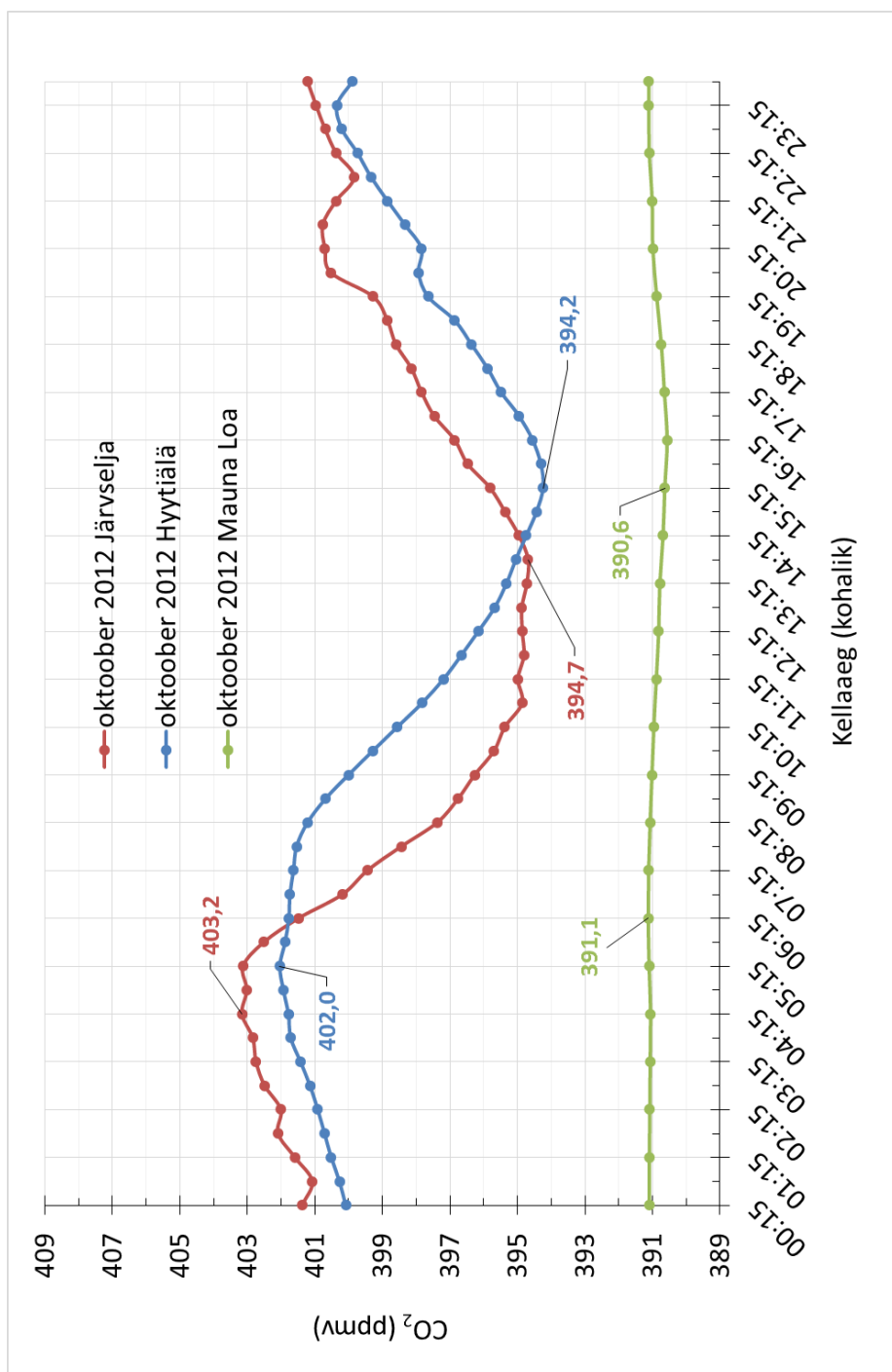
Joonis 13. Järvelja, Hyytiälä 30-minuti (aritmeetilised) ja Mauna Loa 1 tunni (aritmeetilised) keskmised ja nende põhjal leitud kuu (aritmeetilised) keskmised CO₂ mõõtmistulemused perioodil 29.03.2012–7.02.2014. Järvelja ja Hyytiälä mõõtmistulemused on saadud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna). „CO₂ Järvelja kuu keskmine (filtr)“ kujutab kella 12:00–16:00 poole tunni keskmist leitud kuude aritmeetilist keskmist



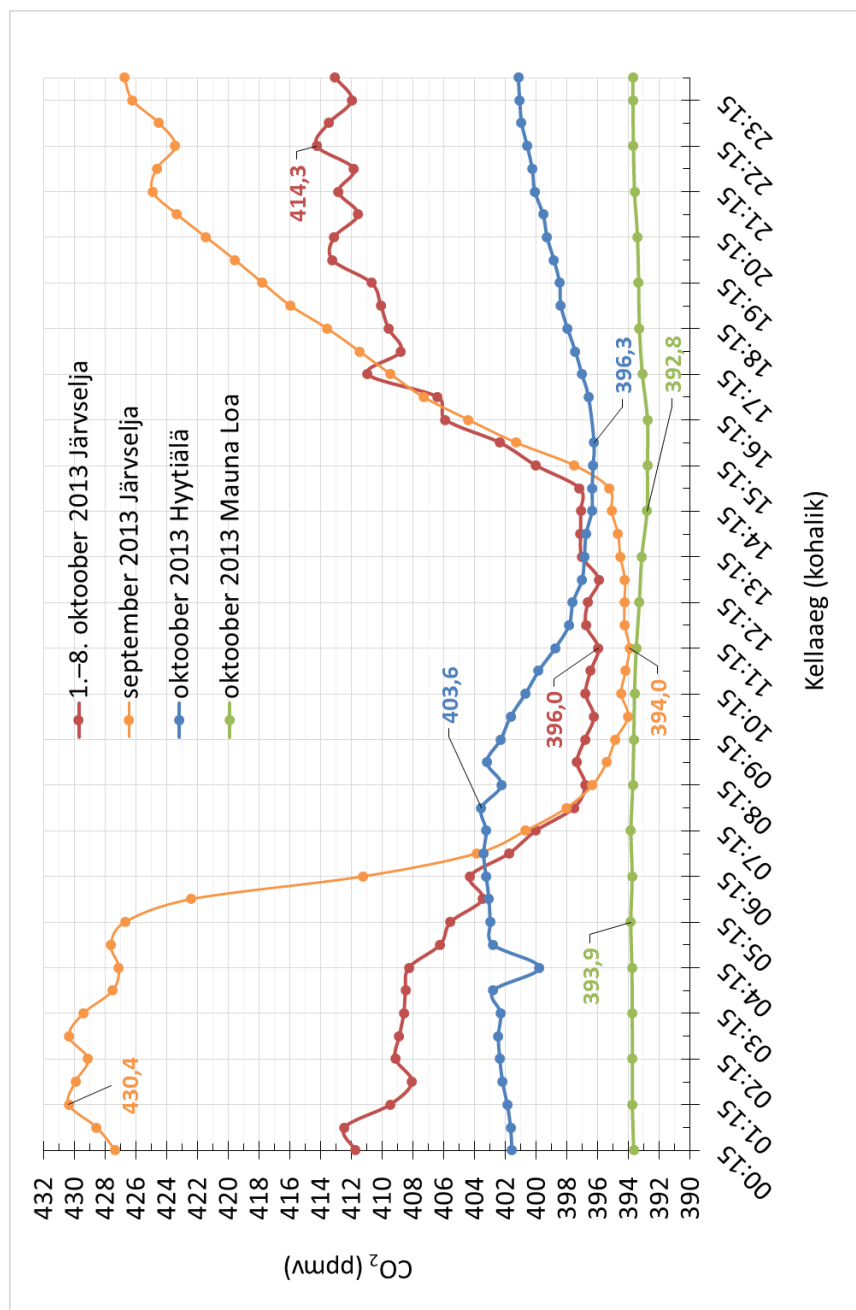
Joonis 14. CO₂ ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläs ja Mauna Loal 2012. a. juunis aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 15. CO₂ ööpäevane käik Järveljal, Hyttiäläl ja Mauna Loal 2013. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyttiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna). Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 16. CO₂ ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläl ja Mauna Loal 2012. a. oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna). Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 17. CO₂ ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläl ja Mauna Loal 2013. a. septembri (Järvelja) ja oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Järvelja oktoobri keskmiste puhul on kasutatud perioodi 1.–8. oktoober 2013 väärtusi. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)

3.2. CH₄ sesoonne ja ööpäevane dünaamika

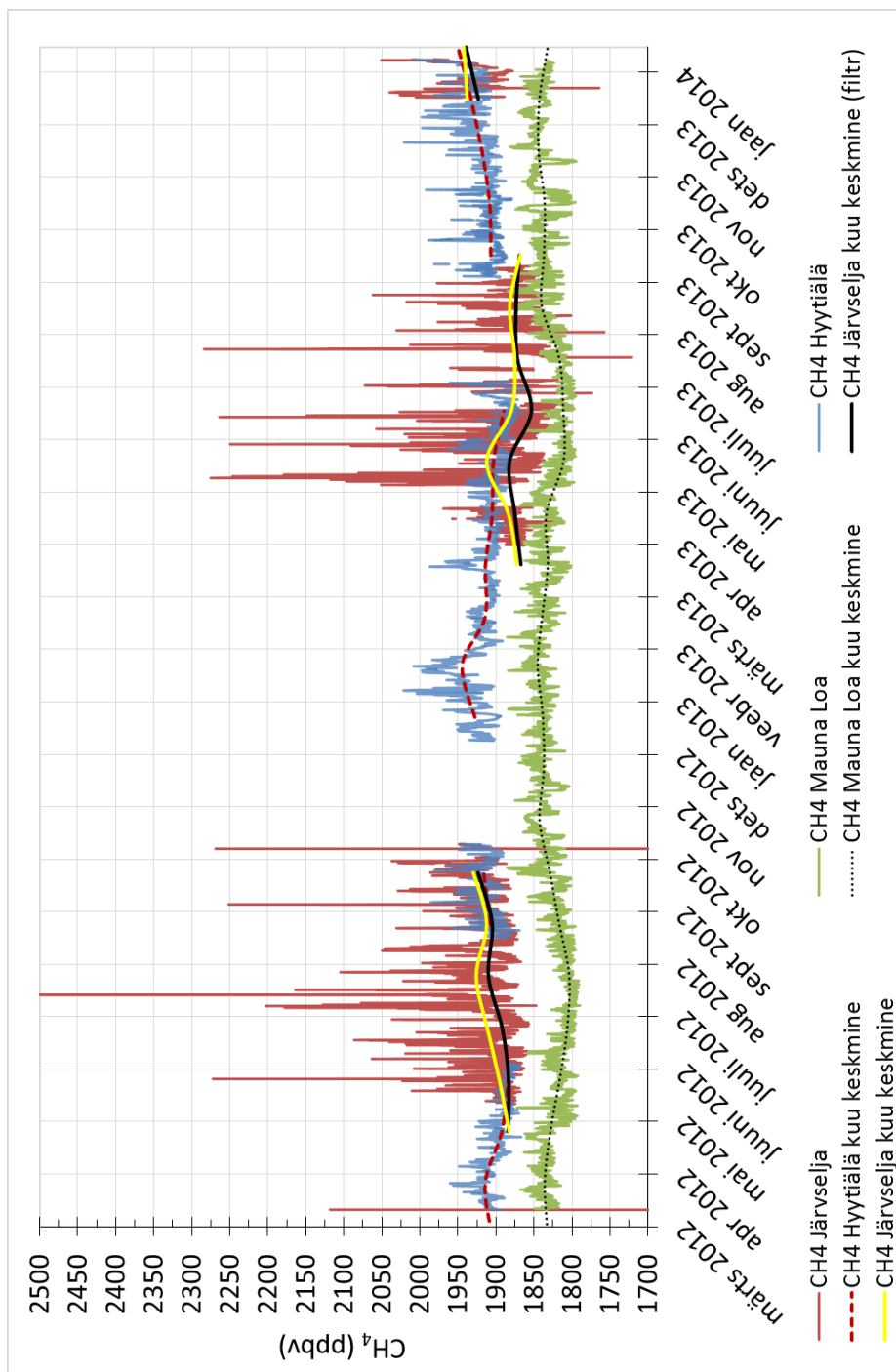
Järvelja ja Hyytiälä 30 minuti ja Mauna Loa 1 tunni aritmeetilised keskmised CH₄ osakaalud õhus on toodud joonisel 18. Lisaks kujutatakse joonisel 18 eelnimetatud algandmete põhjal arvutatud kuu aritmeetilisi keskmisi kontsentratsioone. Järvelja metaani sesoonse käigu paremaks tuvastamiseks on eraldi näidatud ainult kella 12:00–16:00 poole tunni keskmistest arvutatud kuu keskmised kontsentratsioonid. Päevased mõõtmistulemused kajastavad CH₄ kontsentratsioone hästisegunenud õhust, on seega kõige vähem mõjutatud CH₄ ööpäevase tsükli suurest amplituudist ning sobivad paremini tuvastama CH₄ ööpäevast käiku. Kuu keskmistest kontsentratsioonidest võib kõikidest uuritud jaamadest tuvastada nõrga CH₄ sesoonse käigu miinimumiga suvekuudel ja maksimumiga talvel/varakevadel. Sesoonsuse olulisemaks põhjuseks on reageerimine CH₄ peamise neeldajaga, atmosfääri OH radikaalidega, mis toimub kõige tugevamalt suveperioodil ja kõige nõrgemalt talvel (Aalto *et al.* 2007; Satar *et al.* 2016). CH₄ sesoonne käik suvise miinimumi ja talvise maksimumiga on tuvastatud ka näiteks Worthy *et al.* (1998) poolt Fraserdale jaamast Kanadas, Schmidt *et al.* (2014) poolt Trainou tornist Prantsusmaal. Kõige kõrgemal tasemel kulgeb CH₄ sesoonne käik Hyytiäläs (uurimisperioodi keskmine 1912,3±22,6 ppbv-d), natuke madalamal tasemel, kuid kõige suurema varieeruvusega on sesoonne käik Järveljal (uurimisperioodi keskmine 1905,5±52,7 ppbv-d). Mauna Loal taustajaamana on sesoone käik madalaimal tasemel (uurimisperioodi keskmine 1829,5±17,8 ppbv-d).

2012. ja 2013. a. juuni CH₄ kontsentratsiooni ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 19 ja 20. Jooniste algandmed on antud lisas 3. 2012. ja 2013. a. oktoobri ja septembri (2013 Järvelja) CH₄ kontsentratsiooni ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläs ja Mauna Loal alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 21 ja 22. Mõlema aasta Järvelja juuniku ööpäevane käik toimub kindla mustri järgi: 1) öösel kontsentratsioon tõuseb kuni saavutab ööpäevase maksimumi umbes öösel kolme kuni nelja paiku, 2) seejärel hakkab CH₄ osakaal õhus langema kuni jõuab ööpäevase käigu miinimumini umbes kella 12-ks kuni kella 15-ks, 3) seejärel algab uus kontsentratsiooni tõus. Ööpäevast CH₄ tsüklit põhjustab öösel kujunev inversioon ja sellest tulenev CH₄ akumulatsioon kujunenud stabiilses öises piirikihis (*stable nocturnal boundary layer*) (Satar *et al.* 2016; Winderlich *et al.* 2010; Schmidt *et al.* 2014). Järveljal aitab akumulatsioonile kaasa ka mõõtmiskoha puistu tihe võrastik, mis oluliselt takistab puistu

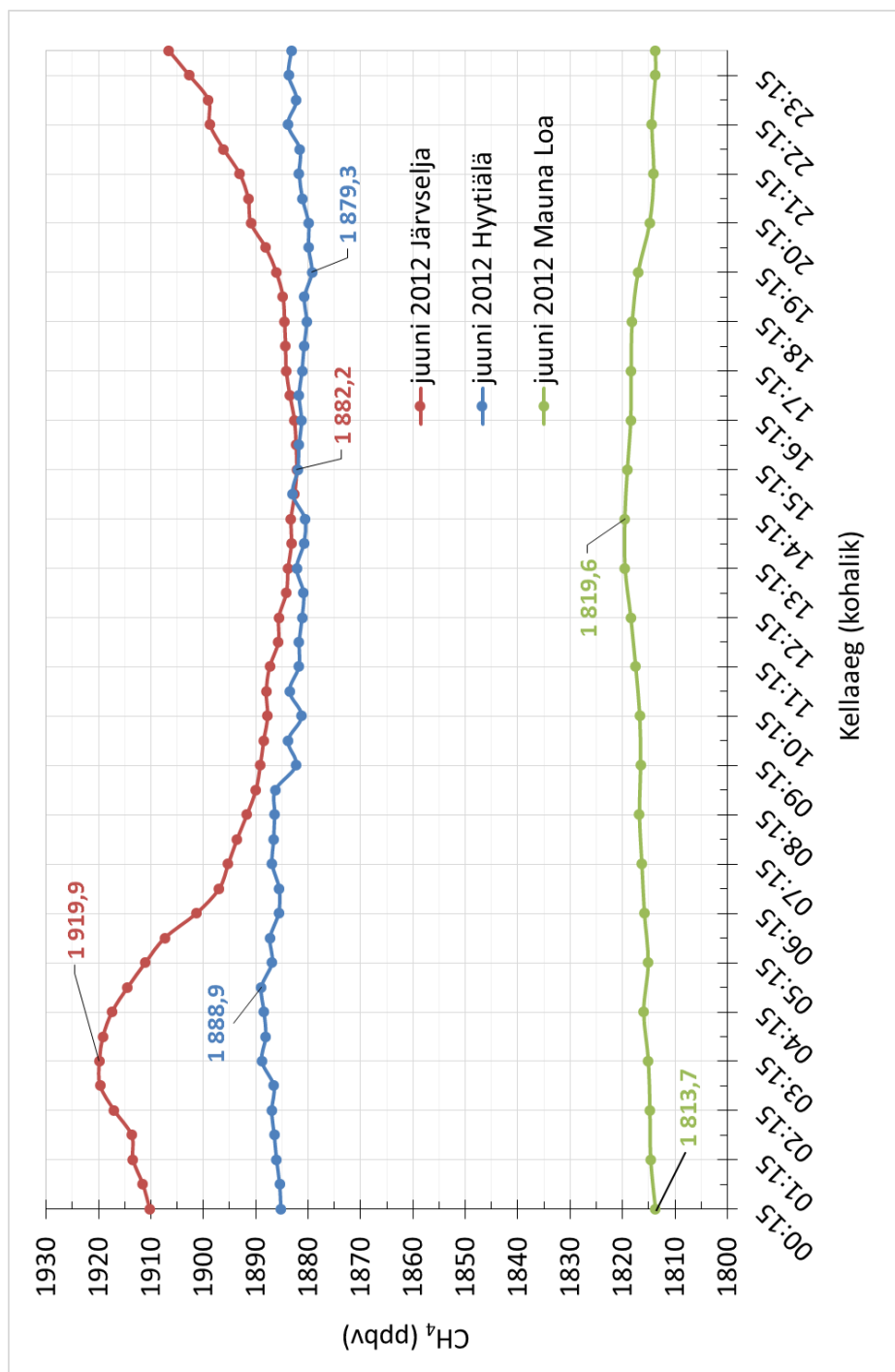
ventileerumist. Õine CH₄ kontsentratsiooni tõus viitab torni piirkonnas toimuvale CH₄ emissioonile. Näiteks Thompson *et al.* (2009) järeldas Saksamaal Ochsenkopf-i jaama mõõtemistulemuste põhjal, et kui öises stabiilses piirikihis CH₄ akumulatsioon ei toimu, siis on torni ümbruses CH₄ vood väga väikesed. OH-radikaalidega reageerimine, CH₄ kaugkanne, mis küll mõjutavad igal ajahetkel mõõdetud CH₄ kontsentratsiooni oluliselt, ei põhjusta metaani ööpäevast tsüklit, kuna on liialt pikaajalised protsessid (Satar *et al.* 2016). Öösel akumulējuva CH₄ allikaks suvekuudel on Järveljal tõenäoliselt emissioonid pinnasest ja märgaladelt. CH₄ kohalike allikate tuvastamine vajaks täpsemat uurimist. Worth *et al.* (1998) leidis Kanada Fraserdale jaama andmete põhjal, et metaani öine kontsentratsioon saavutab maksimumi mõned tunnid hiljem võrreldes CO₂ öise maksimumi saabumise ajaga. See leiab kinnitust ka Järvelja juuniku ööpäevase käigu andmete põhjal — 2012. a. on CH₄ öine maksimumkontsentratsioon kell 3:15 (vs CO₂ 00:45), 2013. a. on CH₄ öine maksimumkontsentratsioon kell 4:15 (vs CO₂ 1:45). Võrreldes Järveljaga on Hyytiäläs CH₄ ööpäevane käik väga väikese amplituudiga. Näiteks juunis 2012 on see Hyytiäläs 9,6 ppbv (vs Järvelja 37,7 ppbv-d) ja 2012. a. oktoobris 9,4 ppbv-d. See viitab, et Hyytiäläs mõjutavad CH₄ kontsentratsiooni pigem suuremastaabilised protsessid (OH-radikaalidega reageerimine, õhumassidega kaasatoodav reostus geograafiliselt kaugel olevatest CH₄ emissiooniallikatest). Suvekuudel on Järvelja ja Hyytiälä puistu tihedused ja sellest tulenev puistu ventilatsioon väga erinevad — Hyytiäläs on ka suvel puistu ventileeritavus hea. Samuti puudub vastupidiselt Järveljale Hyytiäläs liigniiske, soine muld, mis võiks põhjustada CH₄ emissiooni anaeroobsest orgaanilise aine lagunemisest. Samuti on väikese amplituudiga Mauna Loa CH₄ ööpäevane käik (nt 2013. a. juunis 8,2 ppbv-d ja 2012. a. oktoobris 4,9 ppbv-d). Kuu keskmine CH₄ kontsentratsiooni tase juunis on Järveljal kõrgem kui Hyytiäläs (keskmiselt 10 ppbv võrra kõrgem) ja Mauna Loal (keskmiselt 90 ppbv võrra kõrgem).

2012. ja 2013. a. oktoobri CH₄ kontsentratsiooni ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 21 ja 22. Jooniste algandmed on antud lisas 3. 2012. ja 2013. a. oktoobri ööpäevane tsükel on Järveljal suhteliselt erinevad. 2013. a. oktoobri ööpäevase käigu puhul avaldab kindlasti mõju asjaolu, et oktoobrikuu mõõtmistulemused olid vaid perioodi 1.10.2013–8.10.2013 kohta. Järvelja oktoobri ööpäevase käigu muster on sarnane juuni omale öiste kõrgete CH₄ tasemetega ja päevasete madalate kontsentratsioonidega, kuid ööpäevase käigu amplituud on oktoobris märksa väiksem.

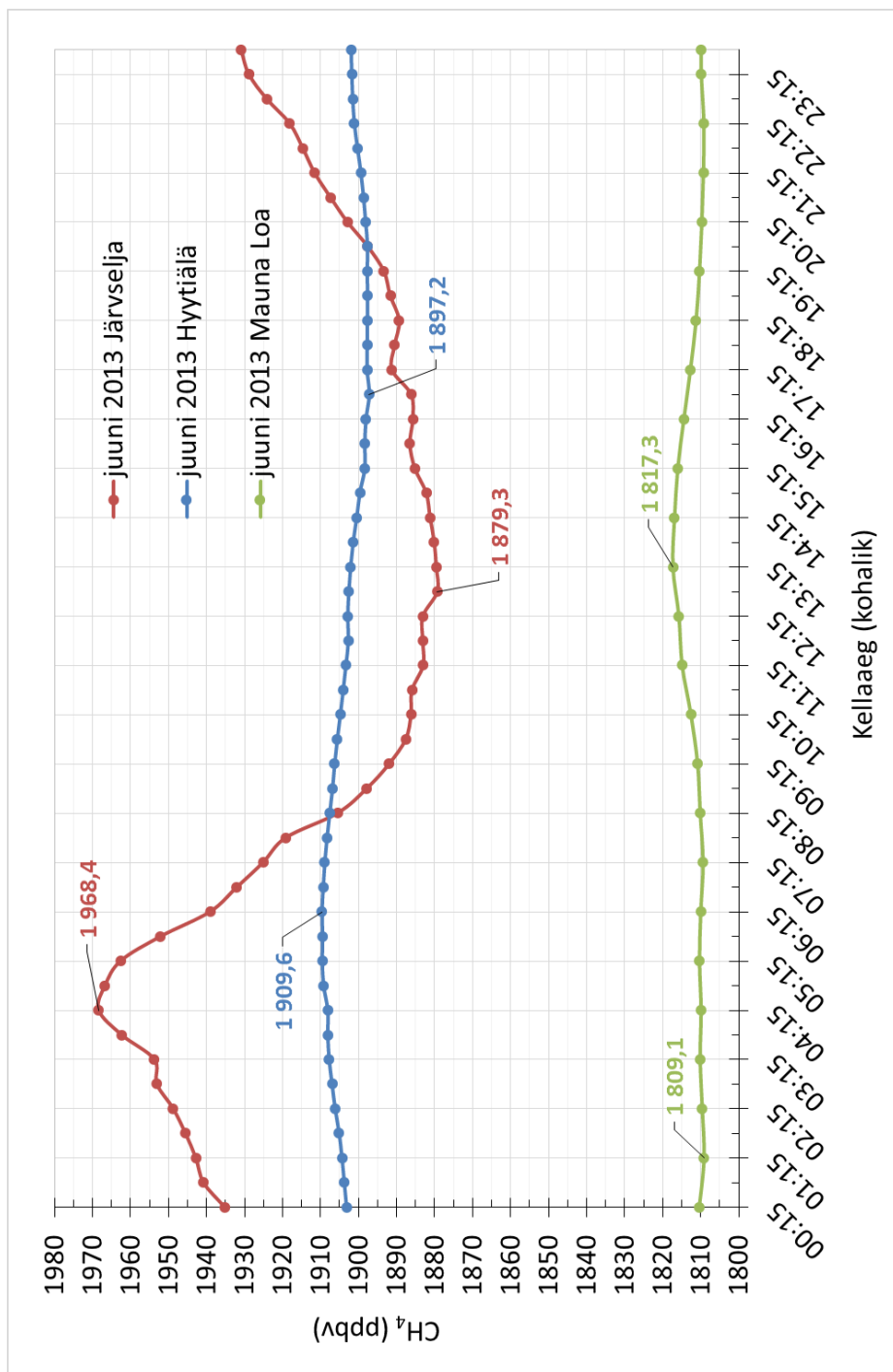
Näiteks 2013. a. oktoobris on Järvelja ööpäevase käigu amplituud 18,1 ppbv-d (vs Järvelja 2013. a. juuni amplituud 89,1 ppbv-d). Põhjuseks võib olla asjaolu, et emissioonid mullast ja märgaladelt võivad sügiseks olla vähenenud võrreldes suvega seoses temperatuuri langusega. Samuti on puistu võrastiku ventileeritavus sügisel juba hea, kuna segametsas olevad lehtpuudelt on lehed langenud. Kuu keskmine CH₄ kontsentratsiooni tase on Järveljal 2012. a. oktoobris kõrgem kui Hyytiäläs (13,8 ppbv võrra kõrgem) ja Mauna Loal (100 ppbv võrra kõrgem).



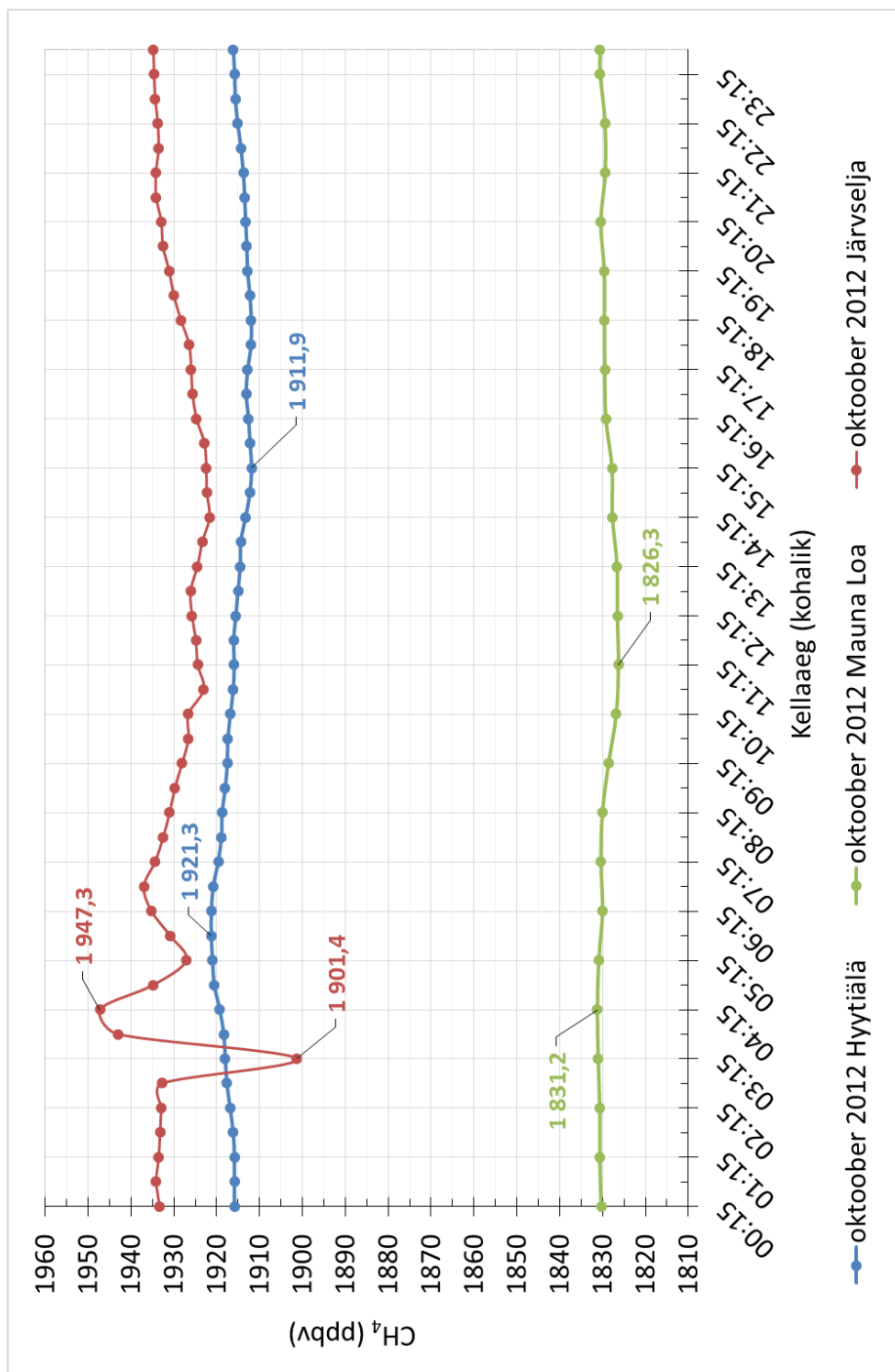
Joonis 18. Järvelja, Hyytiälä 30-minuti (aritmeetilised) keskmised ja Mauna Loa 1 tunni CH_4 (aritmeetilised) keskmised ja nende põhjal leitud kuu (aritmeetilised) keskmised perioodil 29.03.2012–7.02.2014. Järvelja ja Hyytiälä tulemused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna). „ CO_2 Järvelja kuu keskmine (filtr)“ kujutab kella 12:00–16:00 poole tunni keskmistest leitud kuude aritmeetilist keskmist



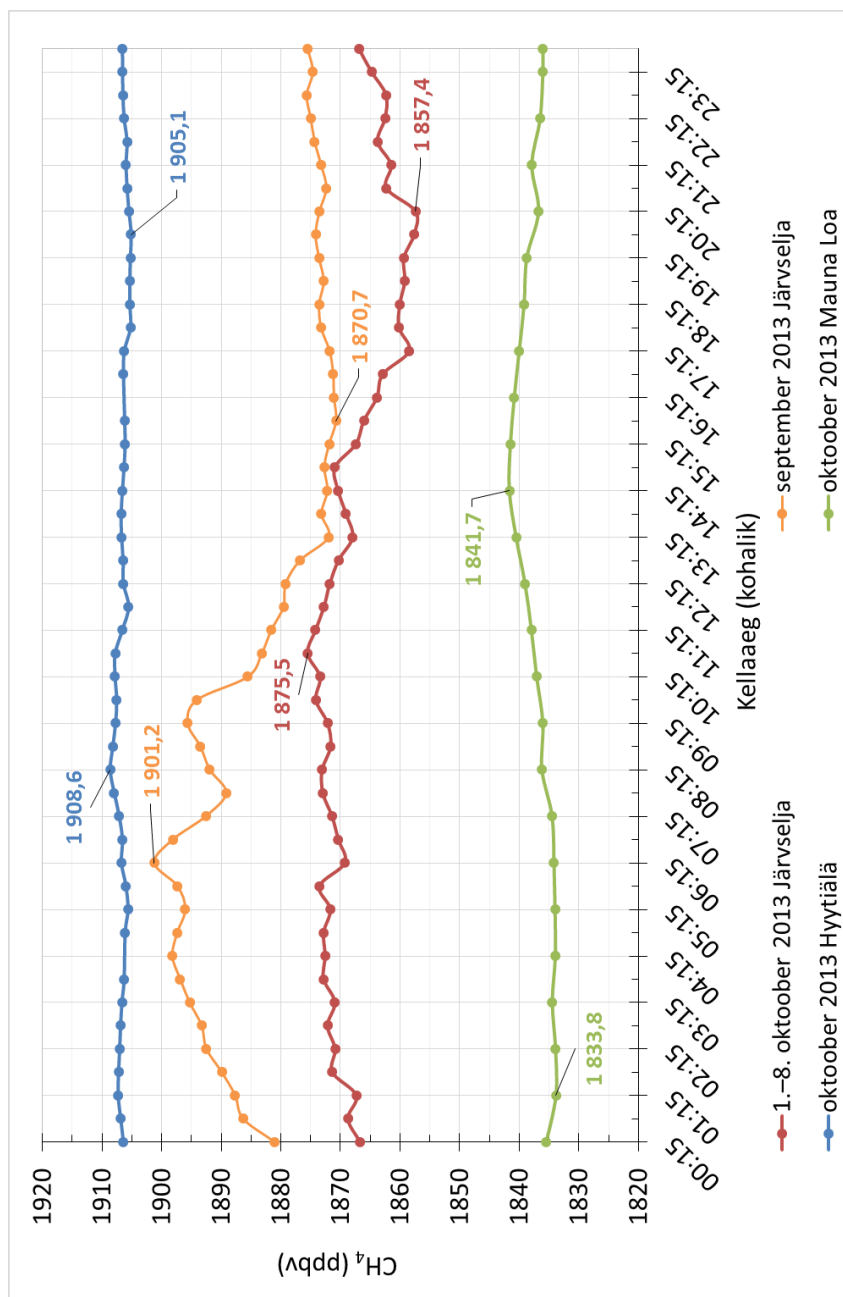
Joonis 19. CH₄ ööpäevane käik Järveljal, Hyttiäläl ja Mauna Loal 2012. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyttiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 20. CH₄ ööpäevane kõik Järveljal, Hyytiäläl ja Mauna Loal 2013. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 21. CH₄ ööpäevane käik Järveläl, Hyytiäläl ja Mauna Loal 2012. a. oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelä ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna). Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)



Joonis 22. CH₄ ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläl ja Mauna Loal 2013. a. septembri (Järvelja) ja oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Järvelja oktoobri keskmiste puhul on kasutatud perioodi 1.–8. oktoober 2013 väärtusi. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Mauna Loa tulemused on mõõdetud 40 m kõrguselt maapinnast (3437 m üle merepinna)

3.3. CO sesoonne ja ööpäevane dünaamika

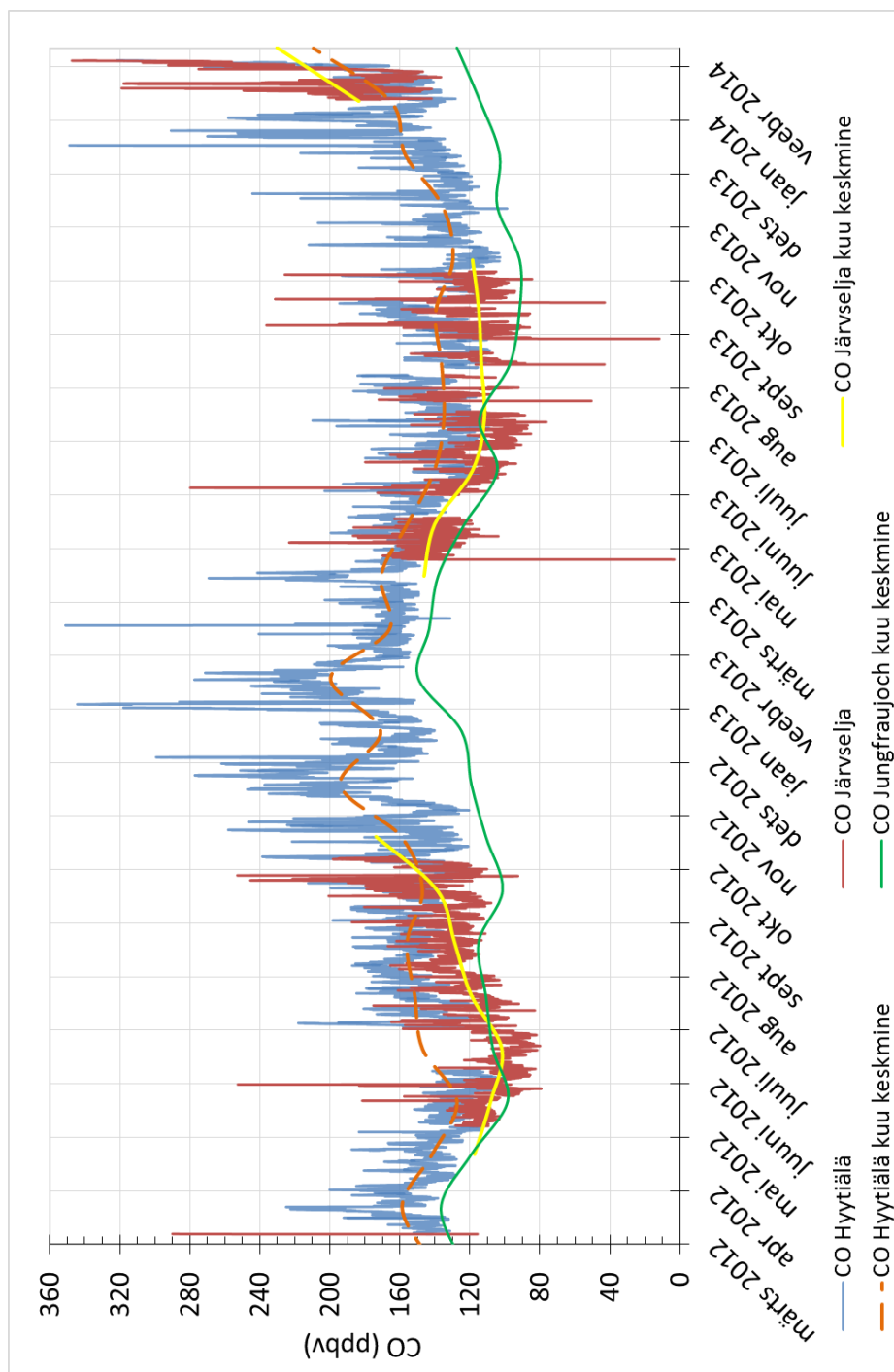
Järvelja ja Hyytiälä 30 minuti aritmeetilised keskmised CO osakaalud õhus on toodud joonisel 23. Lisaks kujutatakse joonisel 23 eelnimetatud algandmete põhjal arvutatud kuu aritmeetilisi keskmisi kontsentratsioone. Jungfraujochi kohta on graafikul esitatud ainult kuu keskmised tulemused. Kuu keskmiste kontsentratsioonide põhjal on Järveljal CO osakaal õhus madalaim juunis 2012. a. ja juulis 2013. Veebruaris 2014 on Järveljal olemasolevate andmete põhjal uurimisperioodi CO maksimumtase. Hyytiäläs ja Jungfraujochil on kuu keskmised CO kontsentratsioonid madalaimad 2012. a. mais ja 2013. a. oktoobris. Kõrgeimad CO kuu keskmised tasemed Hyytiäläs on jaanuaris 2013 ja veebruaris 2014. Jungfraujochi kõrgeimad CO kuu keskmised tasemed uuritava perioodi jooksul on märtsis 2012, jaanuaris 2013 ja veebruaris 2014. Seega joonise 23 põhjal on näha CO kontsentratsiooni sesoonsus. Samasugust sesoonsust, kus CO tase on madal suvel/sügisel ja kõrge hilistalvel kirjeldavad ka näiteks Chi *et al.* (2013), Satar *et al.* (2016), Yver *et al.* (2011), Vermeulen *et al.* (2011), Schmidt *et al.* (2014), Popa *et al.* (2010), Berhanu *et al.* (2015). Sesoonsuse peapõhjus on selles, et soojal aastaajal puudub hoonete kütmisest tulenev CO emissioon ja CO reaktsioon OH-radikaalidega atmosfääris toimub maksimaalse võimsusega. Talvel esinevad stabiilsed külmad õhumassid, mis ei lase toimuda regulaarsel vertikaalsel õhu segunemisel, samuti on CO reaktsioon OH-radikaalidega madalal tasemel ning hoonete kütmisest tekivad olulised CO emissioonid. Jooniselt 23 on näha, et sesoonselt tõusev ja langev CO osakaalu tase õhus kulgeb kõigis kolmes jaamas samas faasis, kuid erinevatel kontsentratsiooni tasemetel. Hyytiälä CO kontsentratsioon on kõige kõrgemal tasemel — see on uurimisperioodi jooksul keskmiselt 23,1 ppbv võrra kõrgem kui Järveljal ja keskmiselt 40,2 ppbv võrra kõrgem kui Jungfraujochil. Neljal kuul uurimisperioodi jooksul (märts ja november 2012, jaanuar ja veebruar 2014) on kuu keskmiste andmete põhjal Järvelja CO kontsentratsioon kolmest jaamast kõige kõrgemal tasemel. Siin tuleb arvestada, et aritmeetiline keskmine võib olla mõjutatud sellest, et nendel kuudel ei tehtud mõõtmisi kõikidel päevadel. Jungfraujoch asub Põhja-Alpide põhjapiiril kõrgusel 3580 m üle merepinna, mistõttu sellest tuvastatud kõige madalam CO tase on iseloomulik taustajaamale, mis mõõdab enamuse ajast inimtegevusest mõjutatud planetaarsest piirikihist kõrgemale jääva õhu koostist. Järvelja ja Hyytiälä CO tasemete erinevuse võimalikuks põhjuseks võib olla asjaolu, et Hyytiälässe saabuvate põhiliste tuulte suund toob kõrgemaid CO kontsentratsioone Tampere linnast. Samuti jääb ca 1 km kaugusele mõõtmiskohast keskmine

liiklustihedusega maantee. Põhjus(ed), miks Järveljal on CO tase õhus võrreldes Hyytiäläga madalam vajaks siiski täpsemat uurimist.

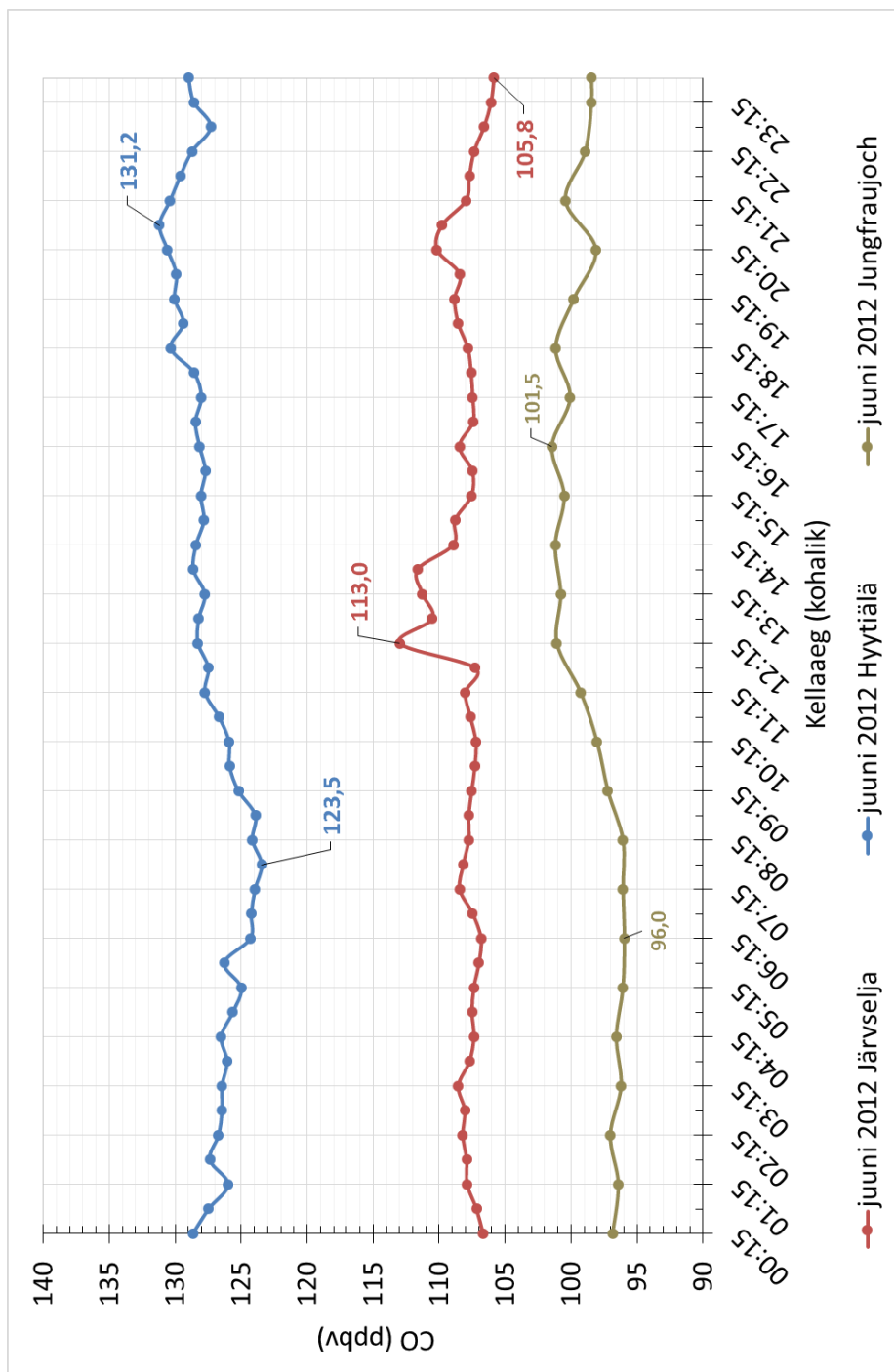
2012. ja 2013. a. juuni CO kontsentratsiooni ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 24 ja 25. Jooniste algandmed on antud lisas 4. 2012. ja 2013. a. oktoobri ja septembri (2013 Järvelja) CO kontsentratsiooni ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläs ja Jungfraujochil alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 26 ja 27. CO ööpäevase käigu amplituud juunis on väike, ööpäevasel käigul puudub CO₂ käigule sarnane väljakujunenud muster. Näiteks 2012. a. juunis on Järveljal maksimaalne CO kontsentratsioon (113 ppbv-d) kell 12:15, minimaalne kontsentratsioon (105,8 ppbv-d) kell 23:15, amplituud seega 7,2 ppbv-d. 2012. a. juuni keskmine CO kontsentratsioon on 108 ppbv-d. 2013. a. juunis on maksimaalne osakaal õhus (122,7 ppbv-d) kell 12:15, minimaalne kell 16:45 (117 ppbv-d), amplituud seega 5,7 ppbv-d. 2013. a. juuni keskmine kontsentratsioon on 119 ppbv-d. Ööpäevaste miinimum ja maksimumkontsentratsioonide ööpäevase esinemise aja juhuslikkuse ja väikese amplituudi poolest on Hyytiälä ja Jungfraujochi mõõtmistulemused sarnased Järvelja tulemustele. Selgelt väljakujunemata ööpäevane käik näitab, et CO kontsentratsioonis on suurim osatähtsus kaugkandel. Suviseid väikese amplituudiga päevased käigud on tuvastatud paljudest jaamadest, nt Beromünsteri kõrgeist tornist Šveitsis (Berhanu *et al.* 2015), Trainou kõrgeist tornist Prantsusmaal (Yver *et al.* 2011; Schmidt *et al.* 2014), Zotino kõrgeist tornist Venemaal (Chi *et al.* 2013), Cabauw kõrgeist tornist Hollandis (Vermeulen *et al.* 2011). Järvelja ja Hyytiälä juunikuu CO kontsentratsiooni ööpäevase käigu amplituud (2012. a. 7,2 ppbv-d ja 2013. a. 5,7 ppbv-d) on samuti lähedane vastavale amplituudile Lääne-Euroopa kõrgetest tornidest. Näiteks Beromünsteri kõrgeist tornist Šveitsis 12,5 m kõrguselt (809,5 m üle merepinna) saadud mõõtmistulemuste ööpäevase käigu amplituud on Satar *et al.* (2016) ja Berhanu *et al.* (2015) andmetel umbes 10 ppbv-d. 2012. a. juuni ööpäevane käik Järveljal toimub keskmiselt 19,3 ppbv võrra madalamal tasemel Hyytiäläst ja 9,6 ppbv võrra kõrgemal tasemel Jungfraujochist. 2013. a. juuni ööpäevane käik Järveljal toimub keskmiselt 21,8 ppbv võrra madalamal tasemel Hyytiäläst ja 14,1 ppbv võrra kõrgemal tasemel Jungfraujochist.

2012. ja 2013. a. oktoobri CO kontsentratsiooni ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 26 ja 27. Jooniste algandmed on antud lisas 4. Võrreldes 2012. a. ja 2013. a. oktoobri kuu keskmisi kontsentratsioone juuni vastavate

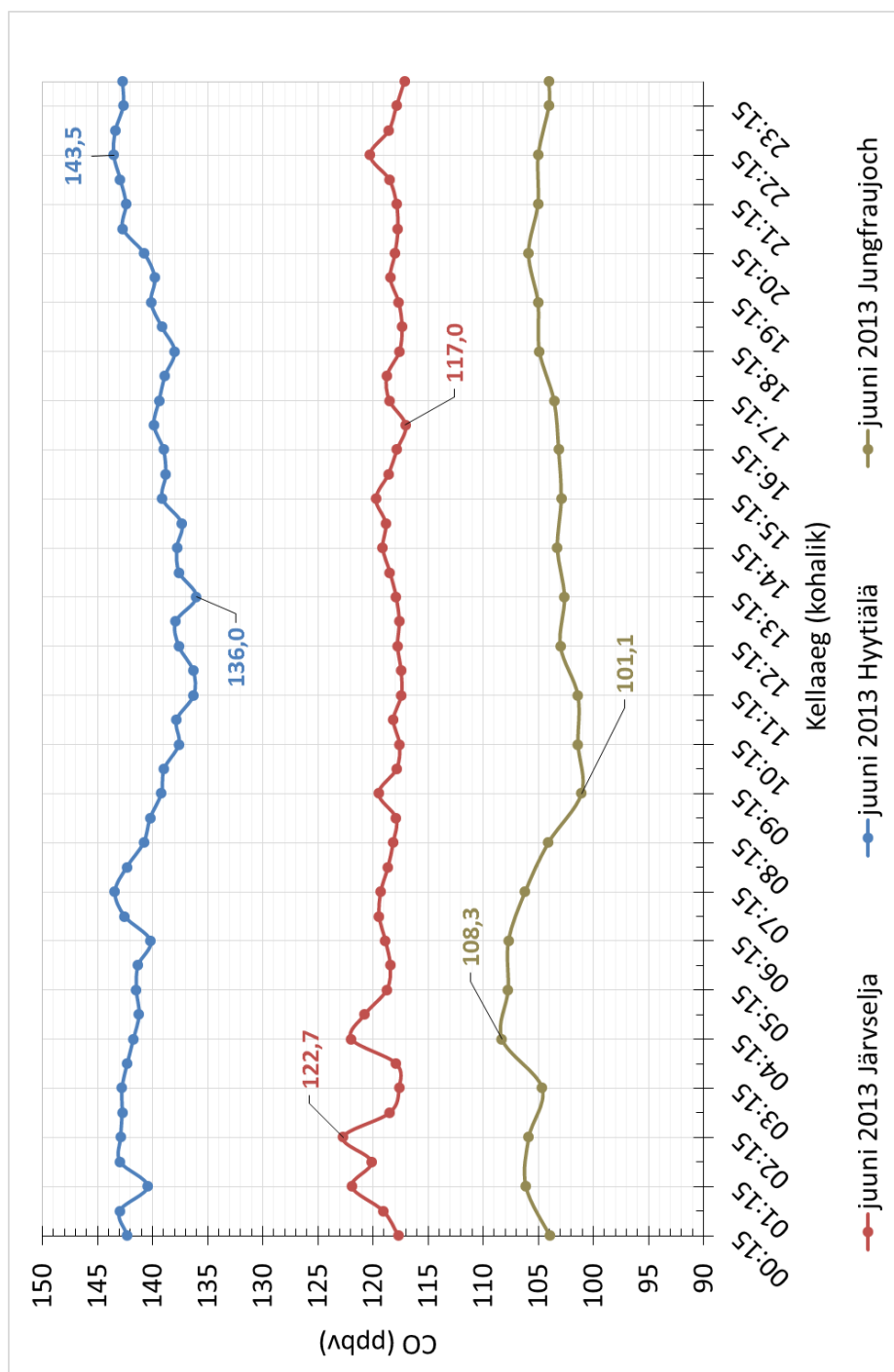
aastate kontsentratsioonidega ilmnevad kõikides uuritud jaamades sesoonselt kõrgemad tasemed 2012. a. oktoobris, kuid mitte 2013. a. oktoobris. 2012. a. sesoonselt kõrgemad tasemed juba oktoobris võivad viidata sellele, et 2012. a. algas Euroopas võrreldes 2013. aastaga kütteperiood varem. Oktoobri CO ööpäevane käik on Järveljal selgema mustriga kui juunis — öösel on kontsentratsiooni tase madalam kui päeval. Selgemalt ilmneb see 2013. a. Järvelja septembri ja oktoobri ööpäevasest dünaamikast. Päevane kõrgem CO kontsentratsioon on tõenäoliselt põhjustatud torni lähistel paiknevate elamute (lähim 165 m kaugusel läänekaares) kütmisest. Hyytiälä ja Jungfraujochi oktoobri ööpäevaste kontsentratsiooni käikude puhul võrreldes juuniga selgemat mustrit ei ilmne. Kuu keskmised kontsentratsioonid on ka oktoobris kõige kõrgemad Hyytiäläs (2012. a. okt. 147,2 ppbv-d ja 2013. a. okt. 129,7 ppbv-d). Järvelja oktoobri kontsentratsioonid on sellest keskmiselt umbes 10 ppbv võrra madalamal tasemel (2012. a. okt. 138,8 ppbv-d ja 2013. a. okt. 18,5 ppbv-d). Jungfraujochi oktoobri kontsentratsioon jääb taustajaamale kohaselt ka oktoobris kõige madalamale tasemele olles Hyytiälä tasemest keskmiselt 42 ppbv ja Järvelja tasemest 32 ppbv võrra madalam.



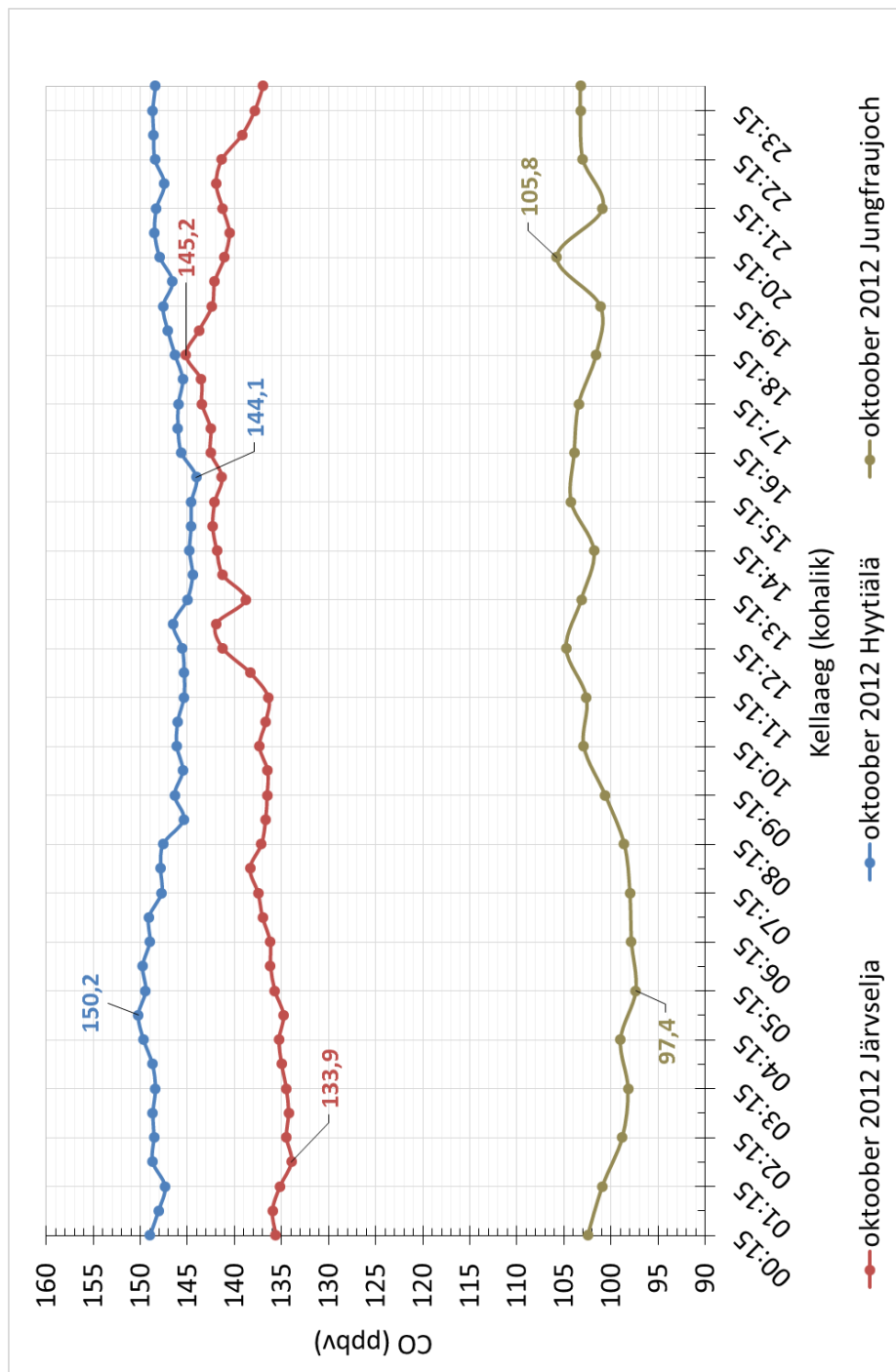
Joonis 23. Järvelä ja Hyytiälä 30-minuti (aritmeetilised) keskmised ja Järvelä, Hyytiälä, Jungfraujochi kuu (aritmeetilised) keskmised CO mõõtmistulemused perioodil 29.03.2012–7.02.2014. Järvelä ja Hyytiälä tulemused on saadud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Jungfraujochi kuu keskmine on arvutatud 1 tunni keskmistest, mis on saadud kõrguselt 3580 m üle merepinna



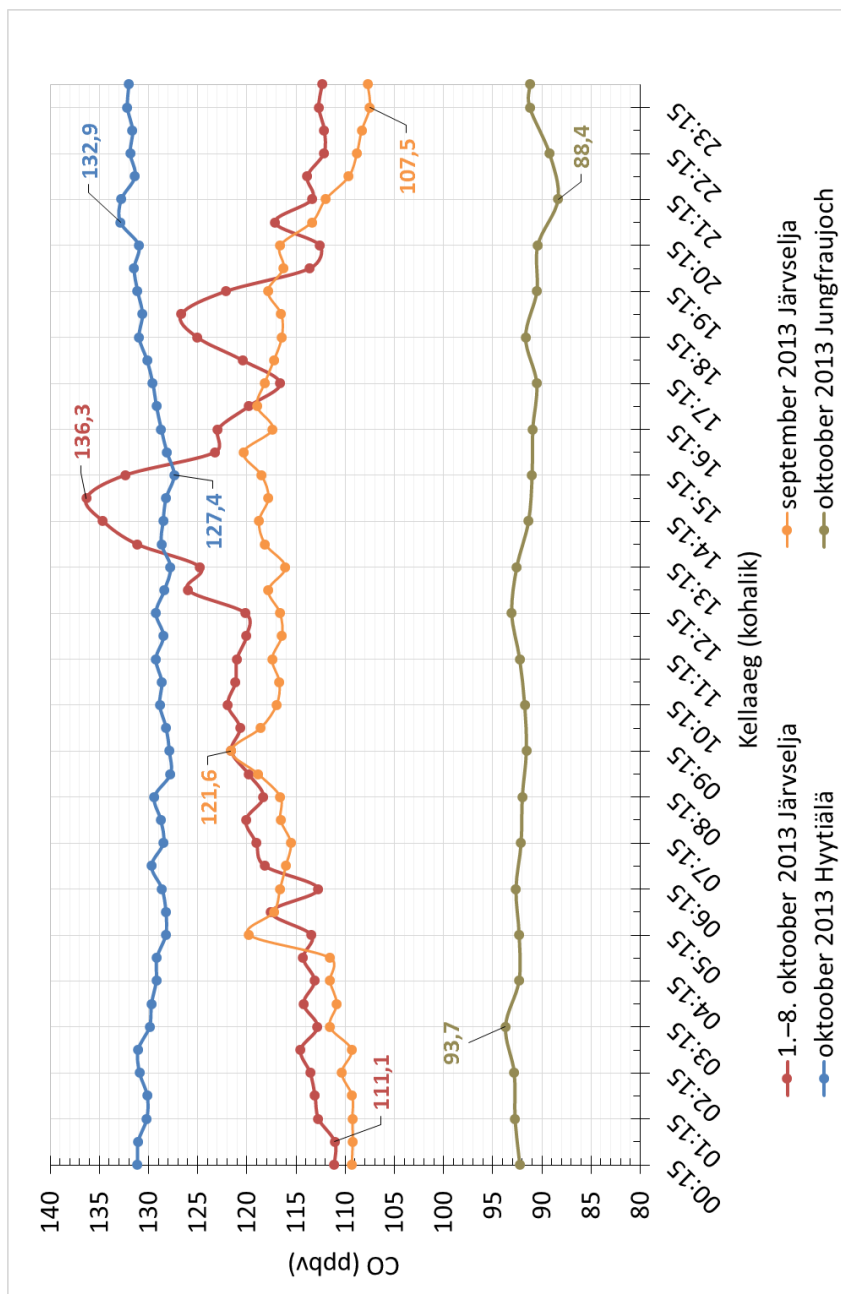
Joonis 24. CO ööpäevane käik Järvseljal, Hyytiäläs ja Jungfraujochil 2012. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvselja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Jungfraujochi väärtused on mõõdetud kõrguselt 3580 m üle merepinna



Joonis 25. CO ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläs ja Jungfraujochil 2013. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna). Jungfraujochi väärtused on mõõdetud kõrguselt 3580 m üle merepinna



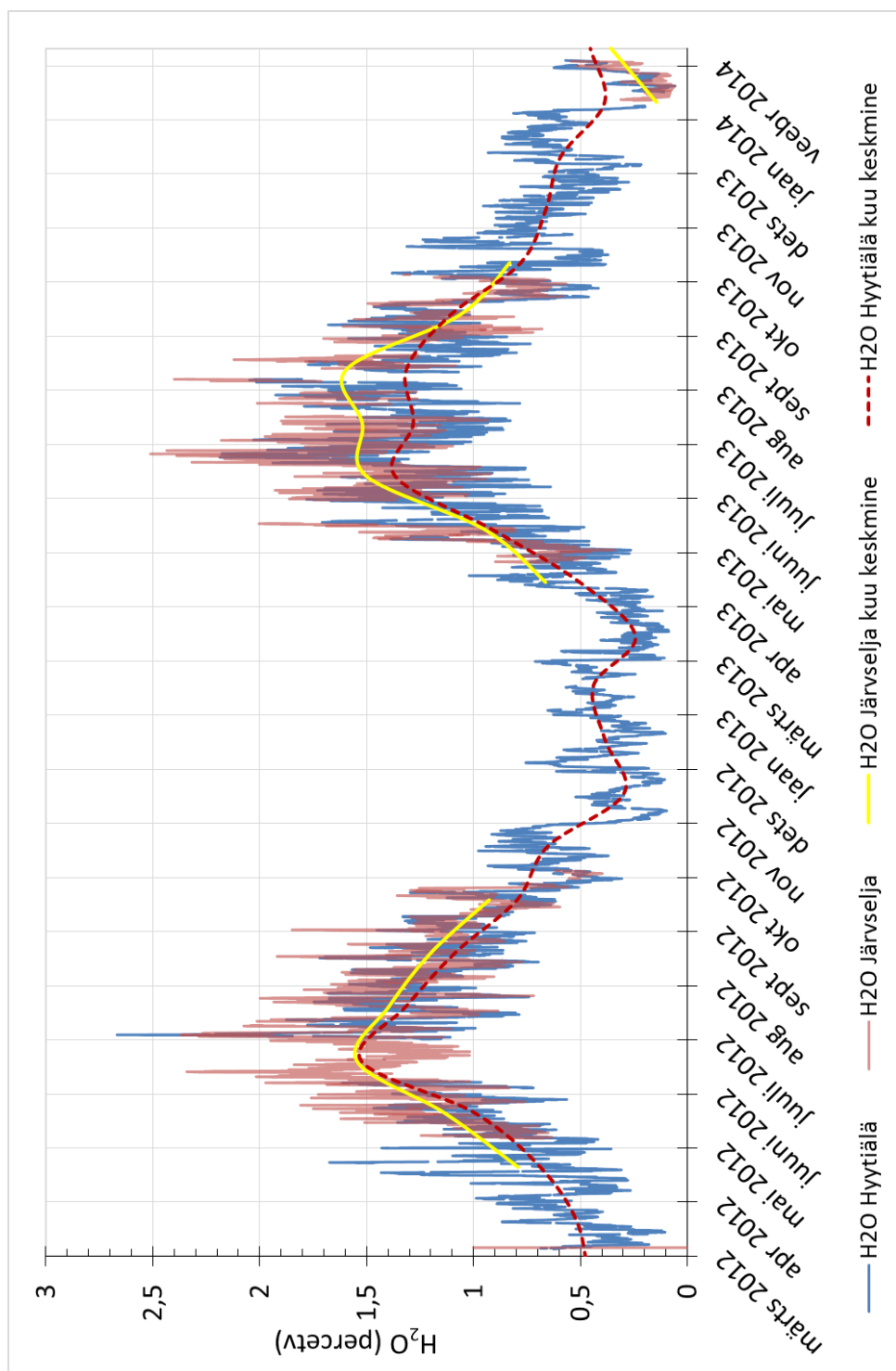
Joonis 26. CO ööpäevane käik Järveljal, Hyytiäläl ja Jungfraujochil 2012. a. oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Jungfraujochi väärtused on mõõdetud kõrguselt 3580 m üle merepinna



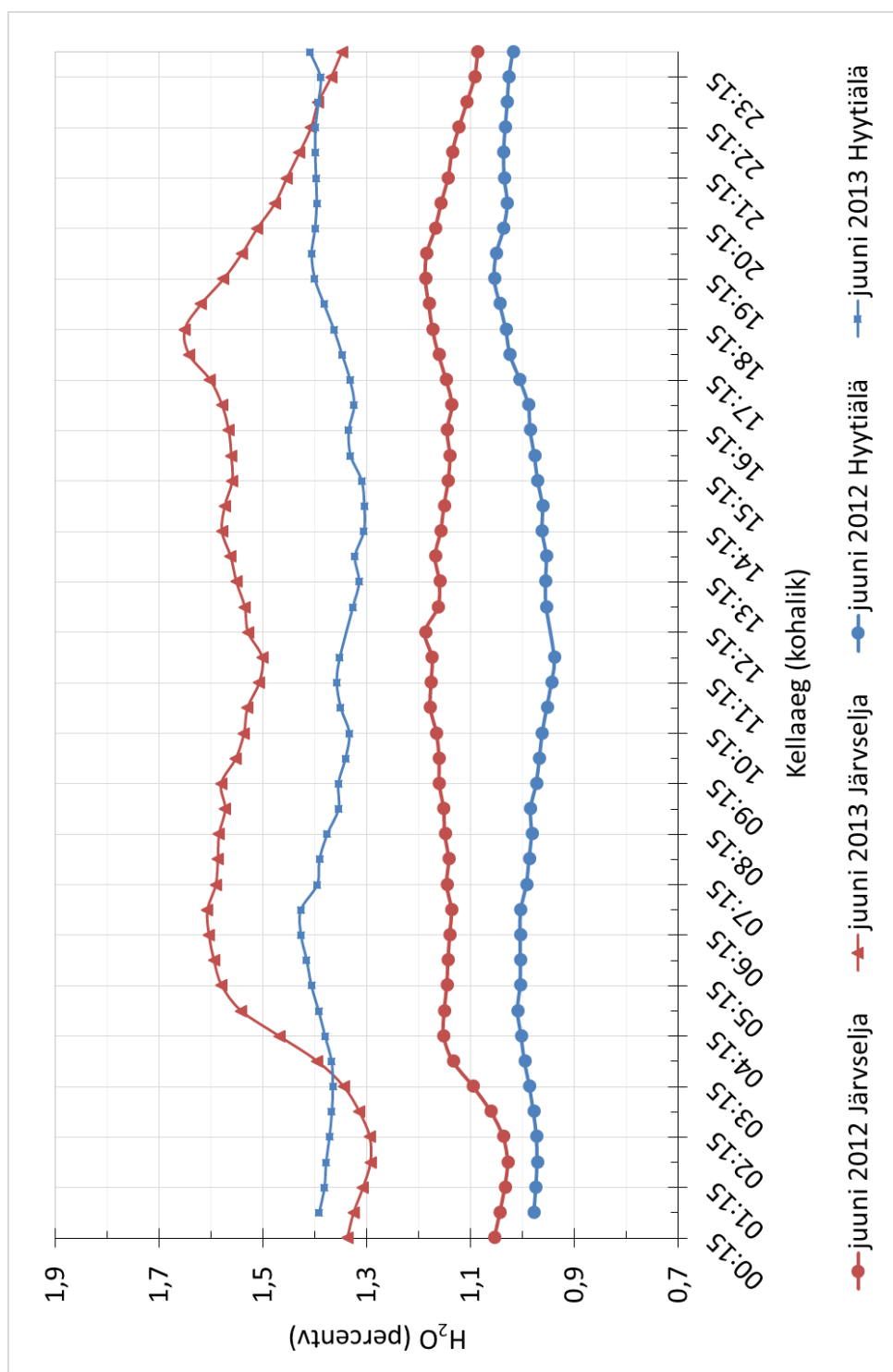
Joonis 27. CO ööpäevane käik Järvseljal, Hyytiäläl ja Jungfraujochil 2013. a. septembri (Järvselja) ja oktoobri aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Järvselja oktoobri keskmiste puhul on kasutatud perioodi 1.–8. oktoober 2013 väärtusi. Ühe kuu kõikidest sama kellaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Eraldi on näidatud iga jaama minimaalne ja maksimaalne väärtus ööpäevase tsükli jooksul. Järvselja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna), Jungfraujochi väärtused on mõõdetud kõrguselt 3580 m üle merepinna

3.4. Veeauru (H₂O) sesoonne ja ööpäevane dünaamika

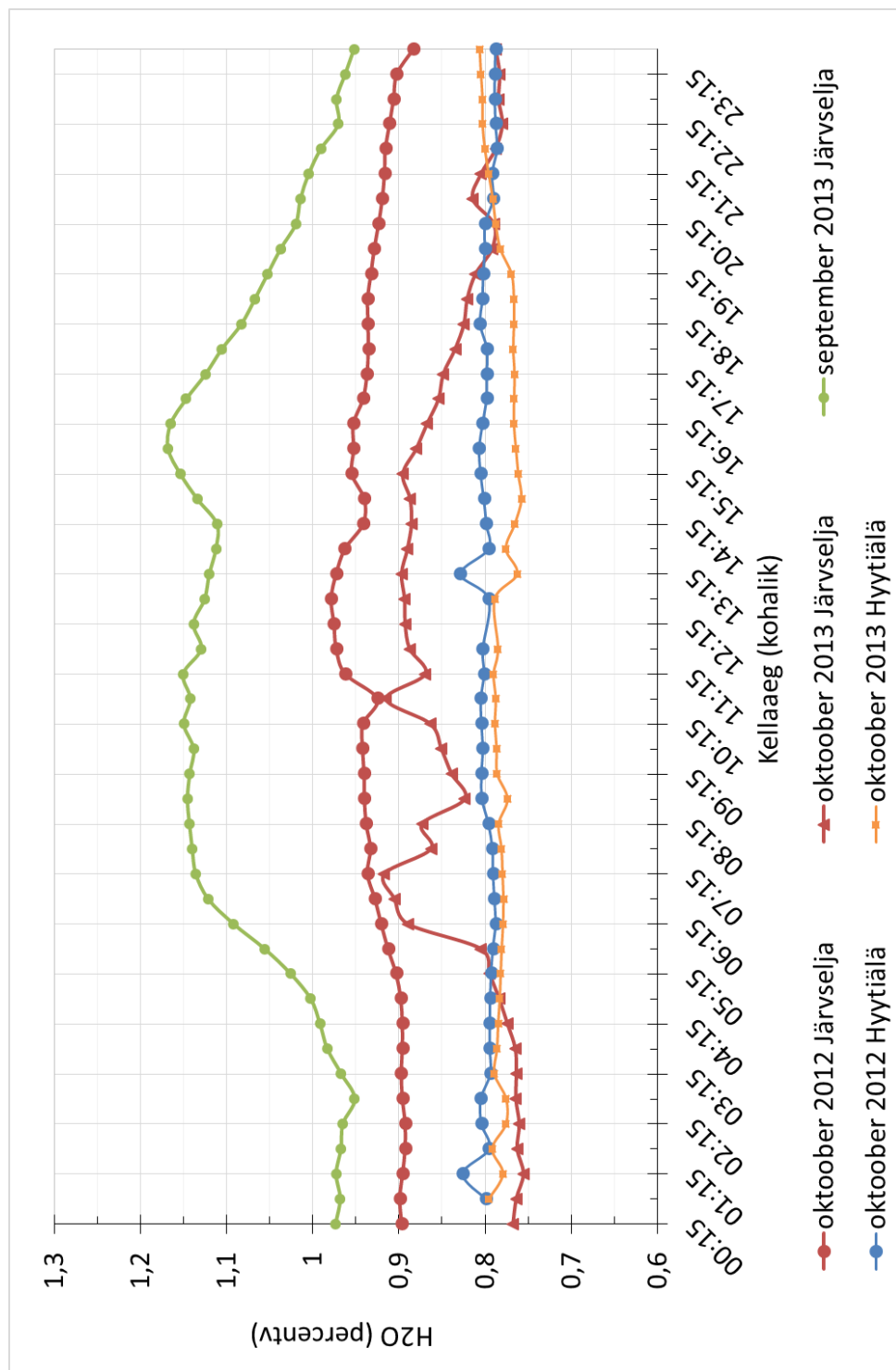
Järvelja ja Hyytiälä 30 minuti aritmeetilised keskmised H₂O osakaalud õhus on toodud joonisel 28. Lisaks kujutatakse joonisel 28 eelnimetatud algandmete põhjal arvutatud kuu aritmeetilisi keskmisi. Jooniselt 28 selgub, et veeaurul on sesoonne käik maksimumiga suvekuudel ja miinimumiga talvel. Veeauru selline käik on tingitud peamiselt õhutemperatuuri samasugusest dünaamikast — maksimaalsed õhutemperatuurid aastas on suvekuudel ja minimaalsed temperatuurid talvekuudel. Samasugune korrelatiivne seos on näha näiteks Winderlich *et al.* (2010) poolt analüüsitud Kesk-Siberis asuva Zotino jaama andmetest. Kuude keskmiste põhjal on Järveljal veeauru sisaldus õhus kõrgem kui Hyytiäläs, välja arvatud septembris 2013, jaanuaris 2014 ja veebruaris 2014. Järvelja kõrgem veeauru osakaal on ilmselt seletatav veidi kõrgema õhutemperatuuriga geograafiliselt lõunapoolsemal Järveljal. 2012. ja 2013. a. juuni ja oktoobri H₂O osakaalu ööpäevane käik uuritud jaamades alates keskööst on toodud vastavalt joonisel 29 ja 30. Jooniste algandmed on antud lisas 5. Joonisel 29 toodud veeauru ööpäevane käik juunis näitab, et 2013. a. juunis on veeauru osakaal õhus Järveljal ja Hyytiäläs keskmiselt 0,37 percentv võrra kõrgem võrreldes 2012. aasta juuniga. See on seletatav ilmselt soojema suvega 2013. a. Nii 2012. kui ka 2013. a. juunis on Järveljal veeauru osakaal keskmiselt 0,14 percentv võrra kõrgem kui Hyytiäläs. See on seletatav Järvelja lõunapoolsema geograafilise asukohaga. Rolli võib etendada Järvelja segametsa tihedam puistu ja liigniiske mullaga segametsa võimalik suurem evapotranspiratsioon. Joonisel 30 toodud oktoobri 2012. ja 2013. a. ööpäevane käik näitab Järvelja heitlikku dünaamikat, seevastu kui Hyytiäläs on püsib veeauru tase ööpäeva jooksul praktiliselt muutumatuna. Ööpäevases tsüklis veeauru osakaalu õhus mõjutavad tegurid Järveljal vajavad täpsemat selgitamist.



Joonis 28. Järvelja ja Hyytiälä 30-minuti (aritmeeatilised) keskmised ja nende põhjal leitud kuu (aritmeeatilised) keskmised H_2O mõõtmistulemused perioodil 29.03.2012–7.02.2014. Järvelja ja Hyytiälä tulemused on saadud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna)



Joonis 29. H_2O ööpäevane käik Järveljal ja Hyytiäläs 2012. ja 2013. a. juuni aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Ühe kuu kõikidest sama kellaaaja tulemustest on võetud aritmeetiline keskmine. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna)



Joonis 30. H₂O ööpäevane käik Järveljal ja Hyytiäläs 2012. ja 2013. a. oktoobri/septembri (Järvelja) aritmeetiliste keskmiste osakaalude põhjal õhus. Järvelja oktoobri keskmiste puhul on kasutatud perioodi 1.–8. oktoober 2013 väärtusi. Järvelja ja Hyytiälä väärtused on mõõdetud vastavalt 24 m ja 16,8 m kõrguselt maapinnast (vastavalt 58,5 m ja 197,8 m üle merepinna)

KOKKUVÕTE

Töös analüüsiti perioodil 29.03.2012–7.02.2014 Järveljalt 24 m kõrguselt hemiboreaalset segametsast mõõdetud CO_2 , CH_4 , CO ja H_2O kontsentratsioone atmosfääris, tuvastati nende gaaside sesoonne ja ööpäevane käik ning võrreldi neid Hyytiälä, Mauna Loa ja Jungfraujochi jaamade andmetega. Taustajaamade Mauna Loa ja Jungfraujochi andmed näitasid eeldatult madalaimaid kontsentratsioonide tasemeid ja väikeseimaid ööpäevaseid amplituude. Tuvastati CO_2 sesoonne käik miinimumiga suvel nagu võrdlemiseks kasutatud jaamadeski. Leiti CO_2 ööpäevane käik Järveljal maksimumiga öösel (suvel umbes kell 00:00–5:00) ja miinimumiga päeval (suvel umbes kell 12:00–16:00). CO_2 ööpäevane käik juunis on sarnase mustri ja faasiga kui Hyytiäläs, kuid ööpäevase käigu amplituud Järveljal on öiste kõrgemate maksimumkontsentratsioonide tõttu märksa suurem. Suuremaid amplituude põhjustab segametsa tihedam võrastik (takistab ventilatsiooni puistus) ja tusedam mullastik (suuremad CO_2 vood). Oktoobris on Järvelja ja Hyytiälä ööpäevase käigu muster, faas, amplituud väga sarnased. Põhjus on selles, et oktoobriks on võrastiku tihedus ja fotosünteesi aktiivsus nii Järveljal kui ka Hyytiäläs muutunud ühetaoliseks — Järveljal on esimese ja teise rinde lehtpuude lehed langenud, puistu ventileeritavus on sarnane Hyytiälä omale. Seega Järvelja ja Hyytiälä metsa ökosüsteemis toimivad sügisel CO_2 siduvad ja vabastavad protsessid võrreldava võimsusega. Ööpäevases CO_2 tsükliks tuvastati Järveljal öiste maksimaalsete kontsentratsioonide langus 1,5–2 tundi varem päikese tõusust. Samuti tuvastati kontsentratsioonide uus tõus päevaselt minimaalselt „platoolt“ märksa varem enne päikese loojangut. Kaks eelnimetatud dünaamika käiku on suhteliselt erandlikud, kuna uuritud teaduskirjanduse andmetel toimub tavaliselt CO_2 kontsentratsiooni öine langus ja päevane tõus samaaegselt päikesetõusu või -loojanguga. Sellise Järvelja erandliku dünaamika põhjused vajaksid lähemat selgitamist.

CH_4 puhul tuvastati kõikides uuritud jaamades väikese amplituudiga sesoonne käik miinimumiga suvel, mis on tingitud OH-radikaalidega reageerimise erinevast tugevusest soojal ja külmal aastaajal. Tuvastati CO_2 -le sarnase mustriga ööpäevane tsükkel maksimumiga öösi umbes kella 3 kuni 4 ajal ja päevase miinimumiga umbes kella 12 kuni 15 ajal. Kooskõlas teaduskirjanduses toodud tulemustega saabus Järveljal öine

maksimum võrreldes CO₂ öise maksimumiga mõned tunnid (2–3 tundi) hiljem. Järvelja ööpäevase käigu amplituud on nii juunis kui oktoobris märksa suurem kui Hyytiäläs, millest võib teaduskirjandusele tuginedes teha järelduse, et öösiti akumulatuuravad Järveljal lokaalsed CH₄ emissioonid. Emissioonide suurimad allikad Järveljal soojal aastaajal on ilmselt sageli liigniiske soine muld ja märgalad. Suvist suuremat ööpäevast amplituudi Järveljal mõjutab ilmselt ka puistu ventilatsiooni takistav tihedam võrastik. Järvelja lokaalsete emissioonide allikad vajaksid täpsemat väljaselgitamist. Üldiselt on nii juunis kui oktoobris kuu keskmised CH₄ kontsentratsioonid kõrgemad võrreldes Hyytiälä ja Mauna Loaga.

Kõikides jaamades tuvastati samasuguse faasiga CO sesoonne kõik madalate kontsentratsioonidega suvel/sügisel ja kõrgemate osakaaludega õhus hilistalvel. Järveljal on sesoonne kontsentratsiooni kõik keskmiselt 23 ppbv võrra madalamal tasemel kui Hyytiäläs. CO sesoonse käigu peamine põhjus on külma aja kõrgemad antropogeensed emissioonid (nt elamute kütmine) ja atmosfääri OH-radikaalidega reageerimise sesoonselt erinev tugevus (suvel tugev, talvel madal). CO ööpäevane kõik Järveljal sarnaneb Hyytiälä ja Jungfraujochi omale — see on võrreldes CO₂-ga ja CH₄-ga väikese amplituudiga ja selgelt väljakujunemata mustri. See viitab, et CO kontsentratsioonis on suurim osatähtsus kaugkandel. Järvelja oktoobri ööpäevane kõik on võrreldes juuniga selgema mustri (lokaalne elamute kütmisest tulenev mõju?). Samas Hyytiälä ja Jungfraujochi oktoobri ööpäevaste kontsentratsiooni kõikude puhul võrreldes juuniga selgemat mustrit ei ilmne.

Järveljal ja Hyytiäläs tuvastati sama faasiga veeauru sesoonne kõik maksimumiga suvekuudel ja miinimumiga talvel. H₂O kontsentratsioon õhus korreleerub hästi õhutemperatuuriga — mida kõrgem õhutemperatuur seda kõrgem veeauru osakaal õhus. Kuude keskmised veeauru osakaalud on Järveljal veidi kõrgemad kui Hyytiäläs, mis on ilmselt tingitud nii Järvelja lõunapoolsemast geograafilisest asukohast kui ka Järvelja tihedama võrastikuga ja niiskema mullaga puistu suuremast evapotraspiratsioonist. Ööpäevases tsüklis Järveljal veeauru osakaalu õhus mõjutavad tegurid vajaksid täpsemat selgitamist.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Aalto, T., Hatakka, J., Lallo, M.** (2007). Tropospheric methane in northern Finland: seasonal variations, transport patterns and correlations with other trace gases. — *Tellus*. Vol. 59B, pp. 251–259.
2. **Aalto, T., Hatakka, J., Paatero, J., Tuovinen, J.-P., Aurela, M., Laurila, T., Holmén, K., Trivett, N., Viisanen, Y.** (2002). Tropospheric carbon dioxide concentrations at a northern boreal site in Finland: basic variations and source areas. — *Tellus*. Vol. 54, No. 2, pp. 110–126.
3. About carbon dioxide. — *S. S. Gas Lab Asia*.
<http://www.liquidgasplants.com/co2.html> (16.05.2017).
4. **Andreae, M. O., Acevedo, O. C., Araùjo, A., Artaxo, P., Barbosa, C. G. G., Barbosa, H. M. J., Brito, J., Carbone, S., Chi, X., Cintra, B. B. L., da Silva, N. F., Dias, N. L., Dias-Júnior, C. Q., Ditas, F., Ditz, R., Godoi, A. F. L., Godoi, R. H. M., Heimann, M., Hoffmann, T., Kesselmeier, J., Könemann, T., Krüger, M. L., Lavric, J. V., Manzi, A. O., Lopes, A. P., Martins, D. L., Mikhailov, E. F., Moran-Zuloaga, D., Nelson, B. W., Nölscher, A. C., Santos Nogueira, D., Piedade, M. T. F., Pöhlker, C., Pöschl, U., Quesada, C. A., Rizzo, L. V., Ro, C. U., Ruckteschler, N., Sá, L. D. A., de Oliveira Sá, M., Sales, C. B., dos Santos, R. M. N., Saturno, J., Schöngart, J., Sörgel, M., de Souza, C. M., de Souza, R. A. F., Su, H., Targhetta, N., Tóta J., Trebs, I., Trumbore, S., van Eijck, A., Walter, D., Wang, Z., Weber, B., Williams, J., Winderlich, J., Wittmann, F., Wolff, S., Yáñez-Serrano, A. M.** (2015). The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 15, No. 18, pp. 10723–10776.
5. **Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., Tokos, K.** (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. — *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. 37, pp. 117–134.

6. **Aref'ev, V. N., Akimenko, R. M., Kashin, F. V., Upenek, L. B.** (2016). Background component of methane concentration in surface air (Obninsk monitoring station). — *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 52, No. 1, pp. 37–44.
7. **Arold, I.** (2005). Eesti maastikud. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. Lk. 453.
8. **Aselmann, I., Crutzen P. J.** (1989). Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. — *Journal of Atmospheric Chemistry*. Vol. 8, No. 4, pp. 307–358.
9. Atmospheric water vapor. — *Remote Sensing Systems*.
<http://www.remss.com/measurements/atmospheric-water-vapor> (16.05.2017).
10. Basics of the carbon cycle and the greenhouse effect. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*.
<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/basics.html> (16.05.2017).
11. **Bazzaz, F. A., Williams W. E.** (1991). Atmospheric CO₂ concentrations within a mixed forest: implications for seedling growth. — *Ecology*. Vol. 72, No. 1, pp. 12–16.
12. **Berhanu, T. A., Satar, E., Schanda, R., Nyfeler, P., Moret, H., Brunner, D., Oney B., Leuenberger, M.** (2015). Measurements of greenhouse gases at Beromünster tall tower station in Switzerland. — *Atmospheric Measurement Technique Discussions*. Vol. 8, No. 10, pp. 10793–10822.
13. **Bonan, G. B., Pollard D., Thompson S. L.** (1992). Effects of boreal forest vegetation on global climate. — *Nature*. Vol. 359, pp. 716–718.
14. **Buchmann, N., Guehl, J. M., Barigah, T. S., Ehleringer, J. R.** (1997). Interseasonal comparison of CO₂ concentrations, isotopic composition and carbon dynamics in an Amazonian rainforest (French Guiana). — *Oecologia*. Vol. 110, pp. 120–131.
15. **Buchmann, N., Kao W. J., Ehleringer J. R.** (1996). Carbon dioxide concentrations within forest canopies — variation with time, stand structure and vegetation type. — *Global Change Biology*. Vol. 2, pp. 421–432.
16. Carbon monoxide (CO). (2005). — *Australian Government: Department of the Environment and Energy*.
<https://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-carbon-monoxide-co> (16.05.2017).
17. Cavity ring-down spectroscopy (CRDS) — *Picarro Inc.*
http://www.picarro.com/technology/cavity_ring_down_spectroscopy (16.05.2017).

18. **Chai, X., Tonjes, D. J., Mahajan, D.** (2016). Methane emissions as energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies. — *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 56, pp. 33–70.
19. Chemical of the week: Methane.
<http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/methane/methane.html> (16.05.2017).
20. **Chi, X., Winderlich, J., Mayer, J. C., Mayer, Panov, A. V., Heimann, M., Birmili, W., Heintzenberg, J., Cheng, J., Andreae, M. O.** (2013). Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower to characterize polluted and pristine air in the Siberian taiga. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 13, pp. 12271–12298.
21. **Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B. H., Nykänen H., Martikainen, P., Oskarsson, H.** (2003). Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. — *Geophysical Research Letters*. Vol. 30, No. 7, pp. 1414.
22. **Ciais, P., Tans, P. P., Trolier, M., White, J. W. C., Francey, R. J.** (1995). A large northern hemisphere terrestrial sink indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 . — *Science*. Vol. 269, pp. 1098–1101.
23. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). /Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. Cambridge: Cambridge University Press. 996 pp. [on-line] IPCC
https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm (16.05.2017).
24. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). /Eds. T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. New York: Cambridge University Press. 1535 pp. [on-line] IPCC <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (16.05.2017).
25. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). /Eds. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson. Cambridge: Cambridge University Press. 881 pp.

- [on-line] https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1_TAR-FRONT.PDF (16.05.2017).
26. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2015). /Eds. R. K. Pachauri, L. A. Meyer. Geneva: IPCC. 151 pp. [on-line] IPCC <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (16.05.2017).
 27. CO Jungfraujoeh – Empa. — *WMO World Data Centre for Greenhouse Gases/Japan Meteorological Agency*. <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/cgi-bin/wdcgg/download.cgi?index=JFJ646N00-EMPA¶m=200612120697&select=inventory> (16.05.2017).
 28. **Crutzen, P. J., Zimmermann, P. H.** (1991). The changing photochemistry of the troposphere. — *Tellus*. Vol. 43, No. 4, pp. 136–151.
 29. **Dlugokencky, E.** Trends in atmospheric methane. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/ (16.05.2017).
 30. **Dlugokencky, E. J., Crotwell, A. M., Lang, P. M., Mund, J. W.** (2017). Atmospheric methane dry air mole fractions from quasi-continuous measurements at Barrow, Alaska and Mauna Loa, Hawaii, 1986–2016. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/?category=Greenhouse%2BGases&frequency=Hourly%2BAverages¶meter_name=Methane&site=MLO (16.05.2017).
 31. **Dlugokencky, E., Tans, P.** Trends in atmospheric carbon dioxide. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global> (16.05.2017).
 32. **Duncan, B. N., Logan, J. A., Bey, I., Megretskaia, I. A., Yantosca, R. M., Novelli, P. C., Jones, N. B., Rinsland, C. P.** (2007). Global budget of CO, 1988–1997: Source estimates and validation with a global model. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112, No. 22.
 33. **Ebi, K. L., McGregor, G.** (2008). Climate change, tropospheric ozone and particulate matter and health impacts. — *Environmental Health Perspectives*. Vol. 116, No. 11, pp. 1449–1455.
 34. **Ehhalt, D., Prather, M., Dentener, R., Derwent, F., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., Wang, M., Bernsten, T., Bey, I., Brasseur, G., Buja, L., Collins, W. J., Daniel, J., DeMore,**

- W. B., Derek, N., Dickerson, R., Etheridge, D., Feichter, J., Fraser, P., Friedl, R., Fuglestedt, J., Gauss, M., Grenfell, L., Grüber, A., Harris, N., Hauglustaine, D., Horowitz, L., Jackman, C., Jacob, D., Jaeglé, L., Jain, A., Kanakidou, M., Karlsdottir, S., Ko, M., Kurylo, M., Lawrence, M., Logan, J. A., Manning, M., Mauzerall, D., McConnell, J., Mickley, L., Montzka, S., Müller, J. F., Olivier, J., Pickering, K., Pitari, G., Roelofs, G. J., Rogers, H., Rognerud, B., Smith, S., Solomon, S., Staehelin, J., Steele, P., Stevenson, D., Sundet, J., Thompson, A., M. van Weele, von Kuhlmann, M. R., Wang, Y., Weisenstein, D., Wigley, T., Wild, O., Wuebbles, D., Yantosca, R. Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. — *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/TAR-04.PDF> (16.05.2017).
35. ESRL/GMD Water Vapor — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ozwv/wwap/> (16.05.2017).
36. Fang, S. X., Tans, P. P., Dong, F., Zhou, H., Luan, T. (2016). Characteristics of atmospheric CO₂ and CH₄ at the Shangdianzi regional background station in China. — *Atmospheric Environment*. Vol. 131, pp. 1–8.
37. Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. (2000). Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments and applications. San Diego: Academic Press.
38. Forster, C., Wandinger, U., Wotawa, G., James, P., Mattis, I., Althausen D., Simmonds P., O'Doherty, S., Jennings, S. G., Kleefeld, C., Schneider, J., Trickl, T., Kreipl, S., Jäger, H. Stohl, A. (2001). Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, No. D19, pp. 22887–22906.
39. Friborg, T., Soegaard, H., Christensen, T. R., Lloyd, C. R., Panikov, N. S. (2003). Siberian wetlands: where a sink is a source. — *Geophysical Research Letters*. Vol. 30, No. 21, pp. 2129.
40. Girach, I. A., Nair, P. R. (2014). On the vertical distribution of carbon monoxide over Bay of Bengal during winter: role of water vapour and vertical updrafts. — *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Vol. 117, pp. 31–47.
41. Gloor, M., Bakwin, P., Hurst, D., Lock, L., Draxler, R., Tans, P. (2001). What is the concentration footprint of a tall tower? — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, No. D16, pp. 17831–17840.

42. **Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker, D., Bourquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I. Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Pak, B. C., Randerson, J., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., Yuen, C. W.** (2002). Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. — *Nature*. Vol. 415, No. 6872, pp. 626.
43. **Halmann, M. M., Steinberg, M.** (1999). Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: science and technology. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.
44. **Han, S., Lin, L., Yu, G., Zhang, J., Wu, J., Zho, X., Guan, D.** (2003). Dynamics of profiles and storage of carbon dioxide in broadleaved Korean forest in Changbai Mountain. — *Journal of Forestry Research*. Vol. 14, No. 4, pp. 275–279.
45. **Hari, P., Kulmala, M.** (2005). Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations (SMEAR II). — *Boreal Environment Research*. Vol. 10, pp. 351–322.
46. **Haszpra, L.** (1995). Carbon dioxide concentration measurements at a rural site in Hungary. — *Tellus*. Vol. 47B, pp. 17–22.
47. **Heikkinen, J. E. P., Elsakov, V., Martikainen, P. J.** (2002). Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia. — *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 16, No. 14, pp. 115.
48. **Higuchi, K., Worthy, D., Chan, D., Shashkov, A.** (2003). Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO₂ at a boreal forest site in Canada. — *Tellus*. Vol. 55B, pp. 115–125.
49. **Hyslop, N. P., Trzepla, K., Wallis, C. D., Matzoll, A. K., White, W. H.** (2013). Technical note: A 23-year record of twice-weekly aerosol composition measurements at Mauna Loa Observatory. — *Atmospheric Environment*. Vol. 80, pp. 259–263.
50. **Jaffe, D., Yurganov, L., Pullman, E., Reuter, J., Mahura, A., and Novelli, P.** (1998) Measurements of CO and O₃ at Shemya, Alaska. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103, No. D1, pp. 1493–1502.
51. **Kaimal, J. C., Finnigan, J. J.** (1994). Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. New York: Oxford University Press.
52. Kaitstavad loodusobjektid. — *Keskkonnaregistri avalik teenus*.
<http://register.keskkonnainfo.ee/envreg/main?list=LO&mount=view> (16.05.2017).

53. **Karnosky, D. F., Skelly, J. M., Percy, K. E., Chappelka, A. H.** (2007). Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests. — *Environmental Pollution*. Vol. 147, pp. 489–506.
54. **Kasischke, E. S., Hyer, E. J., Novelli, P. C., Bruhwiler, L. P., French, N. H. F., Sukhinin, A. I., Hewson, J. H., and Stocks, B. J.** (2005). Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide. — *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 19, No. 1.
55. Kvartalite nimekiri. — *Eesti Maaülikool, Järvselja Metsamajandamise Infosüsteem*. http://jarvselja.emu.ee/printkv.php?kvartal_id=233 (16.05.2017).
56. **Kurz, W. A., Apps, M. J.** (1995). An analysis of future carbon budgets of Canadian boreal forests. — *Water, Air and Soil Pollution*. Vol. 82, pp. 321–331.
57. **Kulmala, M., Hämeri, K., Aalto, P. P., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Nilsson, E. D., Buzorius, G., Rannik, Ü., Dal Maso, M., Seidl, W., Hoffmann, T., Janson, R., Hansson, H.-C., Viisanen, Y., Laaksonen, A. and O'Dowd, C. D.** (2001). Overview of the international project on biogenic aerosol formation in the boreal forest (BIOFOR). — *Tellus*. Vol. 53B, pp. 324–343.
58. **Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, G., Leelőssy, A.** (2013). Atmospheric Chemistry. *Sine loco: Eötvös Loránd University*. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/ch01s03.html> (16.05.2017).
59. **Liang, Q., Jaegle, L., Jaffe, D. A., Weiss-Penzias, P., Heckman, A., and Snow, J. A.** (2004). Long-range transport of Asian pollution to the northeast Pacific: Seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 109, No. D23.
60. **Lopez, M., Schmidt, M., Ramonet, M., Bonne, J. L., Colomb, A., Kazan, V., Laj, P., Pichon, J. M.** (2015). Three years of semicontinuous greenhouse gas measurements at the Puy de Dôme station (central France). — *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. 8, pp. 3941–3958.
61. **Lyubovtseva, Y. S., Sogacheva, L., Dal Maso, M., Bonn, B., Keronen, P., Kulmala, M.** (2005). Seasonal variations of trace gases, meteorological parameters, and formation of aerosols in boreal forests. — *Boreal Environment Research*. Vol. 10, pp. 493–510.

62. **Matthews, E., Fung, I.** (1987). Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. — *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 1, No. 1, pp. 61–86.
63. Methane: Chemical compound. — *Encyclopædia Britannica Inc.*
<https://www.britannica.com/science/methane> (16.05.2017).
64. Metsanduslik info. — SA Järvselja Öppe- ja Katsemetskond.
<http://jarvselja.ee/sihtasutusest/metsanduslik-info/> (16.05.2017).
65. ***Necki, J., Korus, A.** (2001). Measurements of methane surface fluxes in Podhale region. Proceedings of VII National Chromatographic Conference, 5–8 June 2001, Katowice, Poland, 19, viidatud: Necki, J., Schmidt, M., Rozanski, K., Zimnoch, M., Korus, A., Lasa, J., Graul, R., Levin, I. (2003). Six-year record of atmospheric carbon dioxide and methane at a high-altitude mountain site in Poland. — *Tellus*. Vol. 55B, pp. 94–104 vahendusel.
66. **Nilsson, S. G.** (1997). Forests in the temperate-boreal transition: natural and man-made features. — *Ecological Bulletins*. Vol. 46, pp. 61–71.
67. **Noe, S. M., Hüve, K., Niinemets, Ü., Copolovici, L.** (2012). Seasonal variation in vertical volatile compounds air concentrations within a remote hemiboreal mixed forest. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 12, pp. 3909–3926.
68. **Noe, S. M., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., Jõgiste, K., Niinemets, Ü., Hörtnagl, L., Wohlfahrt, G.** (2011). Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia. — *Forest Ecology and Management*. Vol. 262, pp. 71–81.
69. **Noe, S. M., Krasnov, D., Krasnova, A., Cordey, H. P. E., Niinemets, Ü.** (2016a). Seasonal variation and characterisation of reactive trace gas mixing ratios over a hemi-boreal mixed forest site in Estonia. — *Boreal Environment Research*. Vol. 21, pp. 332–344.
70. **Noe, S. M., Niinemets, Ü., Krasnova, A., Krasnov, D., Motallebi, A., Kängsepp, V., Jõgiste, K., Hörrak, U., Komsaare, K., Mirme, S., Vana, M., Tammet, H., Bäck J., Vesala, T., Kulmala, M., Petäjä, T., Kangur, A.** (2016b). SMEAR Estonia: Perspectives of a large-scale forest ecosystem – atmosphere research infrastructure. — *Forestry Studies*. Vol. 63, No. 1, pp. 56–84.
71. **Norisada, M., Tange, T., Suzuki, M., Sasaki, S.** (1998). Temporal and spatial variations in CO₂ concentration within a Japanese cedar forest on a slope land. — *Bulletin of the Tokyo University Forests*. Vol. 99, pp. 109–207.

72. **Novelli, P. C., Masarie, K. A., Lang, P. M.** (1998). Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103, No. D15, pp. 19015–19033.
73. **O'Leary, D.** (2000). Carbon dioxide.
<http://www.ucc.ie/academic/chem/dolchem/html/comp/co2.html> (16.05.2017).
74. Omavalitsusüksuste võrdlus. (2016). — *Statistikaamet*. <http://www.stat.ee/ppe-46953> (16.05.2017).
75. **Panikov, N. S., Dedysh, S. N.** (2000). Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics. — *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 14, pp. 1071–1080.
76. **Penney, D. G.** (2002). Carbon monoxide — an introduction.
<http://www.coheadquarters.com/coproperties.htm> (16.05.2017).
77. **Petrenko, V. V., Martinerie, P., Novelli, P., Etheridge, D. M., Levin, I., Wang, Z., Blunier, T., Chappellaz, J., Kaiser, J., Lang, P., Steele, L. P., Hammer, S., Mak, J., Langenfelds, R. L., Schwander, J., Severinghaus, J. P., Witrant, E., Petron, G., Battle, M. O., Forster, G., Sturges, W. T., Lamarque, J. F., Steffen, K., White, J. W. C.** (2013). A 60 yr record of atmospheric carbon monoxide reconstructed from Greenland firn air. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 13, pp. 7567–7585.
78. Plains CO₂ Reduction (PCOR) Partnership: Global carbon cycle. — *Energy & Environmental Research Center*.
<https://www.undeerc.org/pcor/sequestration/whatisco2.aspx> (16.05.2017).
79. **Popa, M. E., Gloor, M., Manning, A. C., Jordan, A., Schultz, U., Haensel, F., Seifert, T., Heimann, M.** (2010). Measurements of greenhouse gases and related tracers at Bialystok tall tower station in Poland. — *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. 3, pp. 407–427.
80. **Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., Stangenberger, A. G.** (1982). Soil carbon pools and world life zones. — *Nature*. Vol. 298, pp. 156–159.
81. **Reay, D.** Methane sources — termites.
<http://www.ghgonline.org/methaneterminite.htm> (16.05.2017).
82. **Reeburgh, W. S., Whalen, S. C.** (1992). High latitude ecosystems as CH₄ sources. — *Ecological Bulletin*. Vol. 42, pp. 62–70.

83. **Reiners, W. A., Anderson, R. O.** (1968). CO₂ Concentrations in Forests along a Topographic Gradient. — *American Midland Naturalist*. Vol. 80, No. 1, pp. 111–117.
84. **Roulet N. T., Ash, R.** (1992). Low boreal wetlands as a source of atmospheric methane. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 97, pp. 3739–3749.
85. **Ryan, S.** (2001). Estimating volcanic CO₂ emission rates from atmospheric measurements on the slope of Mauna Loa. — *Chemical Geology*. Vol. 177, pp. 201–211.
86. **Satar, E., Berhanu, T. A., Brunner, D., Henne, S., Leuenberger, M.** (2016). Continuous CO₂/CH₄/CO measurements (2012–2014) at Beromünster tall tower station in Switzerland — *Biogeosciences*. Vol. 13, pp. 2623–2635.
87. **Schibig, M. F., Mahieu, E., Henne, S., Lejeune, B., Leuenberger, M. C.** (2016). Intercomparison of in situ NDIR and column FTIR measurements of CO₂ at Jungfraujoch. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 16, pp. 9935–9949.
88. **Schmidt, M., Lopez, M., Kwok, C. Y., Messenger, C., Ramonet, M., Wastine, B., Vuillemin, C., Truong, F., Gal, B., Parmentier, E., Cloue, O., Ciais, P.** (2014). High-precision quasi-continuous atmospheric greenhouse gas measurements at Trainou tower (Orléans forest, France). — *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. 7, pp. 2283–2296.
89. **Seidel, D. J.** (2003). Water vapor: distribution and trends. — *Encyclopedia of global environmental change: The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change*. /Eds. T. Munn, M. C. MacCracken, J. S. Perry. Chichester: Wiley.
90. **Sharma, N. C. P., Barnes, J. E.** (2016). Boundary layer characteristics over a high altitude station, Mauna Loa Observatory. — *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 16, pp. 729–737.
91. **Sidorov, K., Sogachev, A., Langendörfer, U., Lloyd, J., Nepomniachii, I. L., Vygodskaya, N. N., Schmidt, M., Levin, I.** (2002). Seasonal variability of greenhouse gases in the lower troposphere above the eastern European taiga. — *Tellus*. Vol. 54B, pp. 735–748.
92. Smart-SMEAR — *Ministry of Education and Culture*. AVAA. <https://avaa.tdata.fi/web/smart/smeaer/download> (16.05.2017).
93. **Sogacheva, L., Dal Maso, M., Kerminen, V. M., Kulmala, M.** (2005). Probability of nucleation events and aerosol particle concentration in different air mass types

- arriving at Hyytiälä, southern Finland, based on back trajectories analysis. — *Boreal Environment Research*. Vol. 10, pp. 479–491.
94. **Stohl, A., Eekhardt, S., Forster, C., James, P., Spichtinger, N.** (2002). On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 107, No. D23, pp. 4684.
 95. **Sze, N. D.** (1977). Anthropogenic CO emissions: implications for the atmospheric CO–OH–CH₄ cycle. — *Science*. Vol. 195, pp. 673–675.
 96. **Tans, P., Bakwin, P. S., Guenther, D. W.** (1996). A feasible Global Carbon Cycle Observing System: A plan to decipher the carbon cycle based on observations. — *Global Change Biology*. Vol. 2, No. 3, pp. 309–318.
 97. **Tans, P., Thoning, K.** (2008). How we measure background CO₂ levels on Mauna Loa. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about/co2_measurements.html (16.05.2017).
 98. **Thomas, G., Rowntree, P. R.** (1992). The boreal forests and climate. — *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 118, pp. 469–497.
 99. **Thompson, M.** (2005). Carbon monoxide. — *Paul May*. <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/co/coh.htm> (16.05.2017).
 100. **Thompson, R. L., Manning, A. C., Gloor, E., Schultz, U., Seifert, T., Hänsel, F., Jordan, A., Heimann, M.** (2009). In-situ measurements of oxygen, carbon monoxide and greenhouse gases from Ochsenkopf tall tower in Germany. — *Atmospheric Measurements Techniques*. Vol. 2, pp. 573–591.
 101. **Thoning, K. W., Kitzis, D. R., Crotwell, A.** (2015). Atmospheric carbon dioxide dry air mole fractions from quasi-continuous measurements at Mauna Loa, Hawaii, updated annually. — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/?category=Greenhouse%2BGases¶meter_name=Carbon%2BDioxide&frequency=Hourly%2BAverages&site=MLO (16.05.2017).
 102. Traffic volumes. — *Liikennevirasto*. <http://www.liikennevirasto.fi/web/en/maps-charts/traffic-volumes#.WQ1noNKG0Hs> (16.05.2017).
 103. **Ul-Haq, Z., Rana, A. D., Ali, M., Mahmood, K., Tariq, S., Qayyum, Z.** (2015a). Carbon monoxide (CO) emissions and its tropospheric variability over Pakistan using satellite-sensed data. — *Advances in Space Research*. Vol. 56, pp. 583–595.

104. **Ul-Haq, Z., Tariq, S., Ali, M.** (2015b). Atmospheric variability of methane over Pakistan, Afghanistan and adjoining areas using retrievals from SCIAMACHY/ENVISAT. — *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Vol. 135, pp. 161–173.
105. **Vasileva, A. V., Moiseenko, K. B., Mayer, J. C., Jurgens, N., Panov, A., Heimann, M., Andreae, M. O.** (2011). Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 116, No. D7.
106. **Vermeulen, A. T., Hensen, A., Popa, M. E., Van Den Bulk, W. C. M., Jongejan, P. A. C.** (2011). Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992–2010). — *Atmospheric Measurements Techniques*. Vol. 4, pp. 617–644.
107. What are temperature inversions? — *National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Weather Service*.
<http://www.wrh.noaa.gov/slc/climate/TemperatureInversions.php> (16.05.2017).
108. Water vapor. — *Wikipedia*. https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/link-suggestion/wpcd_2008-09_augmented/wp/w/Water_vapor.htm (16.05.2017).
109. Water vapour in the climate system: Special Report. (1995) — *American Geophysical Union*. <https://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/pwv/mockler.html> (16.05.2017).
110. What is the Global Greenhouse Gas Reference Network? — *National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*.
<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about.html> (16.05.2017).
111. **Winderlich, J., Chen, H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavrič, J. V., Kaiser, C., Höfer, A., Heimann M.** (2010). Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia. — *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. 3, pp. 1113–1128.
112. **Worthy, D. E. J., Levin, I., Trivett, N. B. A., Kuhlmann, A. J., Hopper, J. F., Ernst, M. K.** (1998). Seven years of continuous methane observations at a remote boreal site in Ontario, Canada. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103, No. D13, pp. 15995–16007.
113. **Wotawa, G., Novelli, P. C., Trainer, M., Granier, C.** (2001). Inter-annual variability of summertime CO concentrations in the Northern Hemisphere explained by boreal forest fires in North America and Russia. — *Geophysical Research Letters*. Vol. 28, No. 24, pp. 4575–4578.

114. **Wotawa, G., Trainer, M.** (2000). The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. — *Science*. Vol. 288, No. 5464, pp. 324–328.
115. **Wu, J., Guan, D., Yuan, F., Yang, H., Wang, A., Jin, C.** (2012). Evolution of atmospheric carbon dioxide concentration at different temporal scales recorded in a tall forest. — *Atmospheric Environment*. Vol. 61, pp. 9–14.
116. **Wuebbles, D. J., Hayhoe, K.** (2000). Atmospheric methane: trends and impacts. — *Non-CO₂ greenhouse gases: scientific understanding, control and implementation: proceedings of the second international symposium, Noordwijkerhout, The Netherlands, 8–10 september 1999.* /Eds. J. van Ham, A. P. M. Baede, L. A. Meyer, R. Ybema. Dordrecht: Springer Science+Business Media.
117. **Yang, P. C., Black, T. A., Neumann, H. H., Novak, M. D., Blanken, P. D.** (1999). Spatial and temporal variability of CO₂ concentration and flux in a boreal aspen forest. — *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, No. D22, pp. 27653–27661.
118. **Yurganov, L. N., Duchatelet, P., Dzhola, A. V., Edwards, D. P., Hase, F., Kramer, I., Mahieu, E., Mellqvist, J., Notholt, J., Novelli, P. C., Rockmann, A., Scheel, H. E., Schneider, M., Schulz, A., Strandberg, A., Sussmann, R., Tanimoto, H., Velazco, V., Drummond, J. R., and Gille, J. C.** (2005). Increased Northern Hemispheric carbon monoxide burden in the troposphere in 2002 and 2003 detected from the ground and from space. — *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 5, pp. 563–573.
119. **Yurganov, L. N., Grechko, E. I., Dzhola, A. V.** (1999). Zvenigorod carbon monoxide total column time series: 27 yr of measurements. — *Chemosphere: Global Change Science*. Vol. 1, No. 1–3, pp. 127–136.
120. **Yver, C., Schmidt, M., Bousquet, P., Ramonet, M.** (2011). Measurements of molecular hydrogen and carbon monoxide on the Trainou tall tower. — *Tellus*. Vol. 63B, pp. 52–63.

DATA ANALYSIS: GREENHOUSE GASES BACKGROUND CONCENTRATIONS IN FOREST ECOSYSTEM

SUMMARY

Increasing levels of greenhouse gases in Earth's atmosphere are likely to cause changes in climate and biosphere. Climate and biosphere and its ecosystems are in interaction with each other. There is a need to clarify hemiboreal forests role in this interaction as midlatitude forests are considered to be large yet unknown sink of greenhouse gases. Current thesis analyses the mixing ratios of greenhouse gases CO₂, CH₄, CO and H₂O measured from Järvelja hemiboreal forest from 29.03.2012 to 7.02.2014. The aim is to determine seasonal and daily cycles of these gases and compare these cycles with data from atmospheric stations from Hyytiälä, Mauna Loa and Jungfraujoch.

CO₂ is greenhouse gas, which plays main role in global carbon cycle by releasing CO₂ to atmosphere during autotrophic and heterotrophic respiration and binding CO₂ from atmosphere during photosynthesis. CO is considered to be indirect greenhouse gas — it reacts with atmospheric OH-radicals and therefore reduces atmosphere's ability to cleanse itself. CH₄ is much more effective greenhouse gas than CO₂ and its main sources are rice fields, termites, ruminants, wetlands, biomass burning, fossil fuels mining and transport. The amount of water vapour in atmosphere is 0–4% depending on air temperature, height from sea level, atmospheric circulation.

Higuchi *et al.* (2003) describes typical CO₂ summertime daily cycle in Canadian boreal forest: at night photosynthesis stops and CO₂ from plant and soil respiration begins to accumulate in stable nocturnal boundary layer. With sunrise photosynthesis activates again, inversion layers delute and CO₂ levels begin to drop rapidly. This decline continues till midday when concentrations have reached stable level in well mixed air. With sunset CO₂ levels begin to rise again. According to Worthy *et al.* (1998) daily cycle of CH₄ depends on season — in winter daily cycle is hardly noticeable, in summer daily amplitude is maximal. Yver *et al.* (2011) characterizes CO mixing ratio levels from Trainou station in France — CO levels are minimal in summer because in summer CO reaction with OH-

radicals in atmosphere is maximal. CO levels are maximal in winter due to CO's minimal reaction with OH-radicals and increased anthropogenic CO emissions (heating) in winter. According to Lagzi *et al.* (2013) mixing ratios of water vapour are highly variable in time and space.

CO₂, CH₄, CO and H₂O raw data from Järvelja (measured with cavity ring-down spectroscopy analyzer Picarro G2401) was processed with Python *pandas* analyzing module and visualized with MS Excel 2013. 30-minute (Järvelja and Hyytiälä) or hourly (Mauna Loa and Jungfraujoch) mean values and monthly averages was used to analyze seasonal and daily cycle of CO₂, CH₄, CO and H₂O. Daily cycle was visualized for June and October 2012 and 2013.

Seasonal cycle of CO₂ was determined in Järvelja with minimum mixing ratios in summer. Daily cycle in Järvelja has maximum values at night (summer around 00:00–5:00) and minimum values in the afternoon (summer around 12:00–16:00). Daily cycle of CO₂ has same pattern and phase as in Hyytiälä but amplitude is much greater in Järvelja because of higher concentration levels at night in Järvelja. Greater amplitude in Järvelja is caused by denser canopy (hinders canopy ventilation) and thicker soil layer. In October the phase, pattern and amplitude of CO₂ daily cycle is very similar in Järvelja and Hyytiälä. Its probably because broadleaf trees in Järvelja mixed forest have dropped their leaves by October and therefore ventilation conditions are same in Järvelja and Hyytiälä.

Seasonality in CO₄ reaction with OH-radicals caused seasonal cycle (summer minimum, winter maximum) in CH₄ mixing ratios in Järvelja. The pattern of CH₄'s daily cycle is analogous with CO₂ but has smaller amplitude. CH₄ reaches its nighttime maximum mixing ratio level 2 to 3 hours later than CO₂. The amplitude of CH₄'s daily cycle both in June and October is much greater in Järvelja than in Hyytiälä. It indicates that Järvelja CH₄ daily cycle is influenced by local emissions. Probable local CH₄ sources in Järvelja are emissions from wetlands, thick swampy soil. Determination of exact sources of CH₄ in Järvelja need further studies.


Monthly average concentration levels of CO are highest in Hyytiälä, Järvelja has middle levels and Jungfraujoch has lowest levels. CO daily cycle has very small amplitude and

unclear pattern compared to daily cycles of CO₂ and CH₄. It indicates that long-range transport comprises main part of CO mixing ratios. Pattern in October in Järvelja is more distinct, probably because of local sources (heating).

Seasonal cycle of water vapour in Järvelja has same phase as in Hyytiälä. Monthly average water vapour mixing ratios in Järvelja are slightly higher in Järvelja than in Hyytiälä. Its probable cause in addition to higher temperatures in Järvelja are the influence of denser canopy and higher evaporation level.

LISAD

Lisa 1. Alandmete koondamiseks kasutatud skripti näide

 eemalda_tyhikud_viimase_veeru_jarelt.py ✓ 04/08/2017

```
File Edit View Language F

1 import glob, os, re
2
3 os.chdir(os.path.join('D:\Koolitood\Magistrit66'))
4 #määra töökataloog
5 for file in glob.glob('Materjalid_Noelt\\*\\*.dat',recursive=True):
6     #otsi töökataloogi kataloogist "Materjalid_Noelt ja selle alamkataloogidest faile lõpuga ".dat"
7     #for file in glob.glob('Materjalid_Noelt\\2012\\2012\\03\\29\\*.dat'):
8     if file=='Noelt_koondatud\\tulemus.txt':
9         continue
10    if file=='Materjalid_Noelt\\2012\\2012\\03\\29\\CFKADS2054-20120329-1920152-DataLog_User.dat':
11        #jätta see fail vahele, kuna selle faili veerud on erinevad
12        continue
13        with open(file,'r') as f:
14            file_content=f.read()
15        #loe faili sisu
16        f.seek(0)
17        #mine faili algusesse
18        with open('Noelt_koondatud\\tulemus.txt','a') as p:
19            p.write(re.sub(' ' + ',';', file_content))
20        #kui on mitu tühikut järjest, siis asenda need ühe märgiga ";"
21        #os.chdir(os.path.join('D:\Koolitood\Magistrit66'))
22        with open('Noelt_koondatud\\tulemus.txt','r') as k:
23            for line in k:
24                rea_viimane_symbol=line.rstrip()[-1]
25        #leia rea viimane sümbol
26        if rea_viimane_symbol==';':
27            #kui rea viimane sümbol on ";"
28                jarjekoht=line.rfind(';')
29            #leia rea paremast otsast alustades märgi ; jarjekoht
30            ridamargita=line[0:int(jarjekoht)]
31            #rida kuni järjekohani
32            with open('Noelt_koondatud\\tulemus_rea_lopusymbolita.txt','a') as u:
33                #ava fail "margita_oige" olekus "append"
34                u.write(ridamargita+'\n') #kirjuta faili "margita_oige" rida "ridamargita"
35            else:
36                #kui rea viimane sümbol ei ole ";"
37                with open('Noelt_koondatud\\tulemus_rea_lopusymbolita.txt','a') as u: #ava fail nimega "tulemus_rea_lopusymbolita"
38                    u.write(line)
39            #kirjuta avatud faili rida
40            print('valmis')
```

Lisa 2. Järvselja CO₂ ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013

Kella- aeg	Juuni 2012		Juuni 2013		Oktoober 2012		Oktoober 2013		September 2013	
	arit. keskm CO ₂ , ppmv	n	arit. keskm CO ₂ , ppmv	n	arit. keskm CO ₂ , ppmv	n	arit. keskm CO ₂ , ppmv	n	arit. keskm CO ₂ , ppmv	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
00:15	416,8	30	460,6	28	401,4	29	411,8	7	427,3	24
00:45	418,1	30	460,2	29	401,1	29	412,5	7	428,6	24
01:15	417,1	30	462,2	29	401,6	29	409,5	7	430,4	24
01:45	417,6	30	464,7	29	402,1	29	408,1	7	429,9	24
02:15	416,9	30	464,3	29	402,0	29	409,2	7	429,1	24
02:45	413,9	29	463,7	29	402,5	29	408,9	7	430,4	24
03:15	409,1	30	460,7	29	402,7	29	408,6	7	429,4	24
03:45	406,0	30	450,7	29	402,8	29	408,5	7	427,5	24
04:15	402,0	30	429,2	29	403,2	29	408,3	7	427,1	24
04:45	398,3	30	414,6	29	403,0	29	406,3	7	427,6	24
05:15	395,6	30	405,5	29	403,1	28	405,6	7	426,7	24
05:45	394,1	30	401,4	29	402,5	28	403,5	7	422,4	24
06:15	393,0	30	400,0	29	401,5	28	404,3	8	411,2	23
06:45	392,1	30	397,8	29	400,2	28	401,8	8	403,9	23
07:15	391,5	30	396,1	29	399,4	28	400,0	8	400,7	23
07:45	390,9	30	394,9	29	398,4	29	397,6	7	398,0	23
08:15	390,8	30	394,9	29	397,4	29	396,8	7	396,4	23
08:45	389,6	30	393,7	29	396,8	28	397,4	6	395,4	23
09:15	389,1	30	394,8	30	396,3	28	396,9	6	394,9	22
09:45	388,9	30	392,4	29	395,7	28	396,3	6	394,0	22
10:15	388,6	30	392,0	29	395,4	28	396,8	6	394,5	23
10:45	388,5	30	392,3	29	394,9	27	396,5	7	394,2	23
11:15	388,7	30	391,8	29	395,0	28	396,0	7	394,0	23
11:45	389,2	30	391,6	29	394,8	28	396,8	7	394,3	22

Lisa 2 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12:15	389,1	30	392,7	30	394,9	28	396,6	6	394,3	23
12:45	389,3	30	393,7	30	394,9	28	396,0	6	394,2	23
13:15	389,3	30	394,5	30	394,7	29	397,0	6	394,5	23
13:45	389,2	30	394,8	30	394,7	29	397,1	6	394,7	23
14:15	388,8	29	395,4	30	395,0	29	397,1	6	395,1	23
14:45	389,1	29	396,0	30	395,4	29	397,2	6	395,3	24
15:15	389,4	29	395,2	29	395,8	29	400,0	6	397,5	24
15:45	389,8	29	396,0	29	396,5	29	402,4	6	401,3	24
16:15	390,2	29	397,0	29	396,9	29	405,9	6	404,4	24
16:45	390,8	29	399,8	29	397,5	29	406,4	6	407,3	24
17:15	392,0	29	405,4	29	397,8	29	411,0	6	409,5	24
17:45	392,7	29	412,5	29	398,1	29	408,8	6	411,5	24
18:15	393,9	29	420,2	29	398,6	29	409,6	6	413,6	24
18:45	394,8	29	423,9	29	398,9	29	410,1	6	416,0	24
19:15	397,9	29	425,9	29	399,3	29	410,7	6	417,8	24
19:45	401,1	29	433,4	29	400,5	29	413,2	6	419,6	24
20:15	403,8	29	438,3	29	400,7	29	413,1	6	421,5	24
20:45	405,1	30	443,1	29	400,8	29	411,6	6	423,3	24
21:15	406,8	30	445,3	29	400,4	29	412,9	6	424,9	24
21:45	408,5	30	448,2	29	399,8	29	411,9	6	424,7	24
22:15	410,6	30	452,1	29	400,4	29	414,3	6	423,5	24
22:45	410,8	30	453,3	29	400,7	29	413,5	6	424,5	24
23:15	413,3	30	454,4	29	401,0	29	412,0	6	426,2	24
23:45	415,1	30	459,0	29	401,2	29	413,1	6	426,8	24

Märkus. „n“ näitab väärtuste arvu, millest aritmeetiline keskmine võeti ehk mitu 30 minuti keskmist väärtust selle kellaja kohta sellel kuul oli.

Lisa 3. Järvelja CH₄ ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013

Kella- aeg	Juuni 2012		Juuni 2013		Oktoober 2012		Oktoober 2013		September 2013	
	arit. keskm CH ₄ , ppbv	n	arit. keskm CH ₄ , ppbv	n	arit. keskm CH ₄ , ppbv	n	arit. keskm CH ₄ , ppbv	n	arit. keskm CH ₄ , ppbv	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
00:15	1910,2	30	1935,2	28	1933,3	25	1866,7	6	1881,1	23
00:45	1911,5	30	1940,8	29	1934,1	25	1868,8	6	1886,3	22
01:15	1913,4	30	1942,8	29	1933,5	25	1867,3	7	1887,7	22
01:45	1913,7	30	1945,6	29	1933,2	25	1871,4	6	1889,9	22
02:15	1917,0	30	1948,8	29	1932,9	25	1870,9	6	1892,5	22
02:45	1919,7	29	1953,1	29	1932,7	25	1872,2	6	1893,3	22
03:15	1919,9	30	1953,7	29	1901,4	26	1870,9	6	1895,3	21
03:45	1919,2	30	1962,4	29	1943,1	26	1872,8	6	1896,9	20
04:15	1917,4	30	1968,4	29	1947,3	26	1872,6	7	1898,2	20
04:45	1914,4	30	1966,7	29	1934,8	26	1872,8	7	1897,4	20
05:15	1911,1	30	1962,6	29	1927,1	26	1871,7	7	1896,0	20
05:45	1907,4	30	1952,1	29	1930,9	26	1873,5	6	1897,3	20
06:15	1901,3	30	1939,1	29	1935,2	26	1869,3	7	1901,2	19
06:45	1897,0	30	1932,1	29	1937,0	26	1870,4	7	1898,1	20
07:15	1895,3	30	1925,1	29	1934,4	26	1871,4	7	1892,6	20
07:45	1893,6	30	1919,2	29	1932,5	25	1873,0	6	1889,2	20
08:15	1891,7	30	1905,6	29	1931,0	25	1873,1	6	1891,9	20
08:45	1890,0	30	1897,9	29	1929,8	24	1871,7	5	1893,5	20
09:15	1889,1	30	1892,0	30	1928,1	24	1872,2	5	1895,6	19
09:45	1888,5	30	1887,6	29	1926,6	24	1874,1	5	1894,1	19
10:15	1887,7	30	1886,2	29	1926,6	24	1873,4	5	1885,5	20
10:45	1888,0	30	1886,0	29	1923,1	23	1875,5	5	1883,2	21

Lisa 3 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11:15	1887,4	30	1883,0	29	1924,4	24	1874,2	5	1881,6	21
11:45	1885,7	30	1883,1	29	1924,9	24	1872,8	5	1879,6	21
12:15	1885,6	30	1883,1	30	1925,8	24	1871,8	5	1879,2	22
12:45	1884,2	30	1879,3	30	1926,1	24	1870,3	6	1876,8	22
13:15	1883,8	30	1879,6	30	1924,5	25	1868,0	6	1872,0	22
13:45	1883,2	30	1880,1	30	1923,4	25	1869,1	6	1873,2	23
14:15	1883,3	29	1881,2	30	1921,7	26	1870,4	6	1872,2	23
14:45	1882,6	29	1882,2	30	1922,3	26	1870,9	6	1872,7	24
15:15	1882,2	29	1885,2	29	1922,4	24	1867,4	6	1871,9	24
15:45	1882,3	29	1886,5	29	1922,9	24	1866,1	6	1870,7	24
16:15	1882,6	29	1885,8	29	1924,7	24	1863,9	6	1871,1	24
16:45	1883,5	29	1886,2	29	1925,6	25	1862,9	6	1871,2	24
17:15	1884,2	29	1891,2	29	1926,0	25	1858,5	6	1871,8	24
17:45	1884,3	29	1890,5	29	1926,4	25	1860,2	6	1873,3	24
18:15	1884,5	29	1889,3	29	1928,3	25	1860,1	6	1873,6	24
18:45	1884,8	29	1891,7	29	1930,0	25	1859,2	6	1872,8	24
19:15	1886,1	29	1893,4	29	1931,1	25	1859,4	6	1873,6	24
19:45	1888,1	29	1897,6	29	1932,5	25	1857,7	6	1874,2	24
20:15	1890,9	29	1903,0	29	1932,9	25	1857,4	6	1873,5	24
20:45	1891,5	30	1907,4	29	1934,1	25	1862,3	5	1872,4	23
21:15	1893,1	30	1911,6	29	1934,2	25	1861,5	5	1873,3	24
21:45	1896,1	30	1914,7	29	1933,6	25	1863,8	5	1874,3	24
22:15	1898,8	30	1918,1	29	1933,7	25	1862,5	5	1875,0	24
22:45	1899,1	30	1924,2	29	1934,3	25	1862,4	5	1875,7	23
23:15	1902,7	30	1928,9	29	1934,6	25	1864,8	5	1874,6	23
23:45	1906,6	30	1931,0	29	1934,8	25	1866,9	5	1875,5	23

Märkus. „n“ näitab väärtuste arvu, millest aritmeetiline keskmine võeti ehk mitu 30 minuti keskmist väärtust selle kellaja kohta sellel kuul oli.

Lisa 4. Järvelja CO ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013

Kella- aeg	Juuni 2012		Juuni 2013		Oktoober 2012		Oktoober 2013		September 2013	
	arit. keskm CO, ppbv	n	arit. keskm CO, ppbv	n	arit. keskm CO, ppbv	n	arit. keskm CO, ppbv	n	arit. keskm CO, ppbv	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
00:15	106,7	30	117,7	28	135,6	31	111,1	7	109,3	24
00:45	107,2	30	119,1	29	136,0	31	111,1	7	109,2	24
01:15	107,9	30	121,9	29	135,2	31	112,7	7	109,3	24
01:45	107,9	30	120,1	29	133,9	31	113,1	7	109,3	24
02:15	108,2	30	122,7	29	134,5	31	113,6	7	110,4	24
02:45	108,1	29	118,5	29	134,3	31	114,5	7	109,4	24
03:15	108,5	30	117,6	29	134,5	31	112,8	7	111,6	24
03:45	107,7	30	117,9	29	135,0	31	114,2	7	110,9	24
04:15	107,4	30	122,0	29	135,3	31	113,1	7	111,6	24
04:45	107,5	30	120,8	29	134,8	31	114,3	7	111,5	24
05:15	107,4	30	118,8	29	135,7	30	113,5	7	119,8	24
05:45	107,0	30	118,4	29	136,2	30	117,5	7	117,3	24
06:15	106,8	30	118,9	29	136,2	31	112,7	8	116,6	23
06:45	107,5	30	119,4	29	137,0	31	118,2	8	116,0	23
07:15	108,5	30	119,3	29	137,5	31	119,1	8	115,5	23
07:45	108,2	30	118,6	29	138,4	31	120,1	7	116,6	23
08:15	107,8	30	118,2	29	137,1	31	118,3	7	116,6	23
08:45	107,8	30	117,9	29	136,7	30	119,8	7	118,9	23
09:15	107,5	30	119,5	30	136,5	30	121,6	7	121,6	22
09:45	107,3	30	117,9	29	136,5	30	120,7	7	118,6	22
10:15	107,2	30	117,6	29	137,4	30	122,0	7	117,0	23
10:45	107,6	30	118,1	29	136,7	30	121,2	7	116,7	23
11:15	108,0	30	117,4	29	136,4	30	121,0	7	117,4	23

Lisa 4 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11:45	107,3	30	117,5	29	138,3	30	120,0	7	116,4	23
12:15	113,0	30	117,8	30	141,2	30	120,1	6	116,6	23
12:45	110,5	30	117,6	30	142,0	30	126,0	6	117,8	23
13:15	111,3	30	117,9	30	138,8	31	124,8	6	116,1	23
13:45	111,6	30	118,5	30	141,2	31	131,2	6	118,2	23
14:15	108,9	29	119,1	30	141,9	31	134,6	6	118,8	23
14:45	108,8	29	118,8	30	142,3	31	136,3	6	117,8	24
15:15	107,6	29	119,7	29	142,1	31	132,4	6	118,5	24
15:45	107,5	29	118,6	29	141,3	31	123,2	6	120,4	24
16:15	108,5	29	117,8	29	142,5	31	123,0	6	117,4	24
16:45	107,4	29	117,0	29	142,5	31	119,8	6	119,0	24
17:15	107,5	29	118,5	29	143,5	31	116,6	6	118,2	24
17:45	107,6	29	118,7	29	143,6	31	120,5	6	117,2	24
18:15	107,8	29	117,6	29	145,2	31	125,1	6	116,5	24
18:45	108,6	29	117,4	29	143,8	31	126,7	6	116,5	24
19:15	108,8	29	117,7	29	142,4	31	122,1	6	117,9	24
19:45	108,4	29	118,4	29	142,1	31	113,6	6	116,3	24
20:15	110,2	29	118,0	29	141,1	31	112,6	6	116,6	24
20:45	109,8	30	117,7	29	140,6	31	117,2	6	113,4	24
21:15	108,0	30	117,9	29	141,3	31	113,4	6	112,0	24
21:45	107,7	30	118,5	29	141,9	31	113,9	6	109,6	24
22:15	107,3	30	120,3	29	141,3	31	112,2	6	108,8	24
22:45	106,6	30	118,6	29	139,2	31	112,1	6	108,3	24
23:15	106,1	30	117,9	29	137,8	31	112,7	6	107,5	24
23:45	105,8	30	117,2	29	136,9	31	112,4	6	107,7	24

Märkus. „n“ näitab väärtuste arvu, millest aritmeetiline keskmine võeti ehk mitu 30 minuti keskmist väärtust selle kellaja kohta sellel kuul oli.

Lisa 5. Järvelja H₂O ööpäevased keskmised kellaaegade kaupa juunis, septembris, oktoobris 2012 ja 2013

Kella- aeg	Juuni 2012		Juuni 2013		Oktoober 2012		Oktoober 2013		September 2013	
	arit. keskm H ₂ O, percentv	n	arit. keskm H ₂ O, percentv	n	arit. keskm H ₂ O, percentv	n	arit. keskm H ₂ O, percentv	n	arit. keskm H ₂ O, percentv	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
00:15	1,1	30	1,3	28	0,9	26	0,8	6	1,0	23
00:45	1,0	30	1,3	29	0,9	26	0,8	6	1,0	23
01:15	1,0	30	1,3	29	0,9	26	0,8	7	1,0	22
01:45	1,0	30	1,3	29	0,9	26	0,8	6	1,0	22
02:15	1,0	30	1,3	29	0,9	26	0,8	6	1,0	22
02:45	1,1	30	1,3	29	0,9	26	0,8	6	1,0	23
03:15	1,1	30	1,3	29	0,9	26	0,8	6	1,0	21
03:45	1,1	30	1,4	29	0,9	26	0,8	6	1,0	20
04:15	1,2	30	1,5	29	0,9	26	0,8	7	1,0	20
04:45	1,2	30	1,5	29	0,9	26	0,8	7	1,0	20
05:15	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,8	7	1,0	20
05:45	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,8	6	1,1	20
06:15	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,9	7	1,1	19
06:45	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,9	7	1,1	20
07:15	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,9	7	1,1	20
07:45	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,9	6	1,1	20
08:15	1,1	30	1,6	29	0,9	26	0,9	6	1,1	20
08:45	1,2	30	1,6	29	0,9	25	0,8	5	1,1	20
09:15	1,2	30	1,6	30	0,9	25	0,8	5	1,1	19
09:45	1,2	30	1,6	29	0,9	25	0,9	5	1,1	19
10:15	1,2	30	1,5	29	0,9	25	0,9	5	1,1	20
10:45	1,2	30	1,5	29	0,9	24	0,9	6	1,1	21

Lisa 5 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11:15	1,2	30	1,5	29	1,0	24	0,9	5	1,2	21
11:45	1,2	30	1,5	29	1,0	24	0,9	5	1,1	22
12:15	1,2	30	1,5	30	1,0	24	0,9	5	1,1	22
12:45	1,2	30	1,5	30	1,0	24	0,9	6	1,1	22
13:15	1,2	30	1,6	30	1,0	25	0,9	6	1,1	22
13:45	1,2	30	1,6	30	1,0	25	0,9	6	1,1	23
14:15	1,2	29	1,6	30	0,9	26	0,9	6	1,1	23
14:45	1,2	29	1,6	30	0,9	26	0,9	6	1,1	24
15:15	1,1	29	1,6	29	1,0	24	0,9	6	1,2	24
15:45	1,1	29	1,6	29	1,0	24	0,9	6	1,2	24
16:15	1,1	29	1,6	29	1,0	24	0,9	6	1,2	24
16:45	1,1	29	1,6	29	0,9	25	0,9	6	1,1	24
17:15	1,1	29	1,6	29	0,9	25	0,8	6	1,1	24
17:45	1,2	29	1,6	29	0,9	25	0,8	6	1,1	24
18:15	1,2	29	1,7	29	0,9	25	0,8	6	1,1	24
18:45	1,2	29	1,6	29	0,9	25	0,8	6	1,1	24
19:15	1,2	29	1,6	29	0,9	25	0,8	6	1,1	24
19:45	1,2	29	1,5	29	0,9	25	0,8	6	1,0	24
20:15	1,2	29	1,5	29	0,9	25	0,8	6	1,0	23
20:45	1,2	30	1,5	29	0,9	25	0,8	5	1,0	22
21:15	1,1	30	1,5	29	0,9	25	0,8	5	1,0	24
21:45	1,1	30	1,4	29	0,9	25	0,8	5	1,0	24
22:15	1,1	30	1,4	29	0,9	25	0,8	5	1,0	24
22:45	1,1	30	1,4	29	0,9	25	0,8	5	1,0	23
23:15	1,1	30	1,4	29	0,9	25	0,8	5	1,0	23
23:45	1,1	30	1,3	29	0,9	26	0,8	5	1,0	23

Märkus. „n“ näitab väärtuste arvu, millest aritmeetiline keskmine võeti ehk mitu 30 minuti keskmist väärtust selle kellaja kohta sellel kuul oli.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, ASKO PÕDER,
(sünnipäev pp/kuu/aa 18.05.1979)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Andmeanalüüs: kasvuhoonegaaside taustkontsentratsioonid metsa ökosüsteemis,
mille juhendaja on Steffen M. Noe,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)